



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

SMÁČENÍ A ROZTÉKÁNÍ ROZTAVENÉ PÁJKY PO KOVOVÉM POVRCHU

WETTING AND SPREADING OF LIQUID SOLDER ON METAL SURFACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LUKÁŠ KUČERA

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ STARÝ, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Lukáš Kučera

ID: 83547

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Smáčení a roztékání roztavené pájky po kovovém povrchu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Z doporučené studijní literatury se seznámte s problematikou pájení a s ději probíhajícími na mezifázovém rozhraní.

Podrobněji se zaměřte na smáčení a na roztékání kvaziomezeného množství bezolovnaté pájky na měděném povrchu plátovaného základního materiálu FR4 a na chemicky vyloučeném povlaku NiAu.

Pomocí kamery pozorujte smáčení a roztékání pájky po povrchu.

Zpracujte teplotně časovou závislost smáčecího úhlu a teplotně časovou závislost poloměru roztečení pájky na mezifázových rozhraních a výsledky porovnejte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 27.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Předkládaná práce se zabývá problematikou smáčení kovového povrchu roztavenou bezolovnatou pájkou a sledováním dějů probíhajících na mezifázovém rozhraní s použitím metody vyhodnocování výšky roztečené pájky odečítané z videosekvencí. Práce je zaměřena na vyhodnocování smáčivosti kovového povrchu, určené úhlem smáčivosti. Smáčivost kovového povrchu je porovnávána pro různé typy povrchových úprav a pro různé stáří měřených vzorků. Měření probíhá na vylepšeném pracovišti, k vyhodnocování je použito nově odvozeného vztahu pro výpočet smáčecího úhlu a vytvořeného programu pro automatické vyhodnocení snímků.

Abstract:

This work deals with the metal surface wetting problems of molten lead-free solder and monitoring of ongoing processes at the inter-phase interface using the method of evaluation of the height of the molten solder deducted from the video sequences. The work is aimed at evaluating the metal surface wettability, wetting angle determined. Wettability of the metal surface is compared for different types of surface treatments and for different ages of the measured samples. Measurement is performed at the improved workplace, is used to evaluate the newly derived formula for calculating the wetting angle and created program for automatic evaluation of Picture is used to.

Klíčová slova:

Smáčivost, smáčecí úhel, bezolovnaté pájení, kulička pájky, vyhodnocování videosekvencí, základní materiál FR4, povrchová úprava NiAu a OSP.

Keywords:

Wettability, wetting angle, lead-free soldering, sessile solder ball, evaluation of video-sequences, base material FR4, surface preparation ba NiAu and OSP.

Bibliografická citace díla:

KUČERA, L. *Smáčení a roztékání roztavené pájky po kovovém povrchu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 27. 5. 2010

.....

PODĚKOVÁNÍ:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. z Ústavu elektrotechnologie, za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci a za veškerou pomoc při řešení a vypracování diplomové práce. Dále děkuji firmě Gatema Boskovice s.r.o, za výrobu vzorků pro experimentální část práce.

OBSAH

ÚVOD	- 10 -
1 TEORETICKÁ ČÁST	- 11 -
1.1 PÁJENÝ SPOJ A JEHO FORMOVÁNÍ.....	- 11 -
1.2 MATERIÁLOVÝ SYSTÉM	- 12 -
1.2.1 <i>Sn-Ag-Cu pájka a typy slitin</i>	- 12 -
1.2.2 <i>Tavidlo</i>	- 13 -
1.2.3 <i>Povrchová úprava měděného povrchu substrátu</i>	- 14 -
1.3 SMÁČIVOST TUHÝCH POVRCHŮ ROZTAVENOU PÁJKOU	- 15 -
1.3.1 <i>Druhy smáčení povrchu</i>	- 16 -
1.3.2 <i>Podmínky pro smáčení [2]</i>	- 16 -
1.3.3 <i>Smáčecí charakteristiky</i>	- 18 -
1.4 SMÁČENÍ A ROZTÉKÁNÍ PÁJKY PO POVRCHU	- 19 -
1.4.1 <i>Metody zlepšení smáčivosti povrchů</i>	- 19 -
1.4.2 <i>Dynamický kontaktní úhel [2]</i>	- 20 -
1.4.3 <i>Povrchové napětí liquidu kovových prvků a kohezní energie [2]</i>	- 20 -
1.4.4 <i>Povrchová energie solidu kovu a adhezní energie</i>	- 21 -
1.4.5 <i>Tavidlo a interakce</i>	- 22 -
1.5 DĚJE PROBÍHAJÍCÍ NA MEZIFÁZOVÉM ROZHRANÍ.....	- 23 -
1.5.1 <i>Difúze pájky do tuhého kovu základního materiálu [2]</i>	- 24 -
1.5.2 <i>Intermetalická oblast a vliv na pevnost spoje</i>	- 25 -
1.5.3 <i>IMC u bezolovnatého pájení</i>	- 26 -
1.6 ROZPUSTNOST KOVŮ.....	- 27 -
1.7 MĚŘÍCÍ METODY	- 29 -
1.7.1 <i>Metoda smáčecích váh</i>	- 29 -
1.7.2 <i>Metoda SSBA a SBSA</i>	- 31 -
1.7.3 <i>Metoda postupujícího kontaktního úhlu</i>	- 32 -

1.7.4	Metoda nastřelování tekuté pájky	- 33 -
2	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	- 35 -
2.1	MĚŘÍCÍ SESTAVA	- 35 -
2.2	METODIKA MĚŘENÍ	- 39 -
2.2.1	Vzorky	- 39 -
2.2.2	Tavidlo a pájka	- 41 -
2.2.3	Postup měření	- 44 -
2.3	ZPRACOVÁNÍ DAT	- 45 -
2.3.1	Výpočet smáčecího úhlu	- 48 -
2.4	DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	- 51 -
2.4.1	Měření smáčecího úhlu po přetavení	- 57 -
3	DISKUZE VÝSLEDKŮ	- 61 -
3.1	CHYBY MĚŘENÍ	- 65 -
4	ZÁVĚR	- 66 -
5	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	- 68 -
6	SEZNAM OBRÁZKŮ	- 70 -
7	SEZNAM TABULEK	- 72 -
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	- 73 -
	SEZNAM PŘÍLOH.....	- 74 -
	PŘÍLOHA 1: SEKvence SNÍMKŮ PŘIPRAVENÝCH K ANALÝZE.....	- 75 -
	PŘÍLOHA 2: SEKvence SNÍMKŮ PŘEVEDENÁ DO ČB BITMAPY PRO AUTOMATICKÉ VYHODNOCOVÁNÍ	- 76 -
	PŘÍLOHA 3: PŘÍKLAD VÝPOČTU SMÁČECÍHO ÚHLU	- 77 -

Úvod

Technologie pájení patří k nejstarším metodám spojování kovových materiálů působením tepla, přesto je řazeno mezi progresivní technologie. Pájení součástek patří do kategorie měkkého pájení s pracovními teplotami do 450 °C. Měkké pájení je proces metalurgického spojování kovových částí roztavenou pájkou, zpravidla za přítomnosti tavidel.

Desky plošných spojů jsou základem většiny elektronických systémů. A u všech se klade velký důraz na jejich spolehlivost, kterou ovlivňuje právě především kvalita pájeného spoje. Základem pro kvalitně zapájený spoj je dobrá pájitelnost povrchů. Špatná pájitelnost povrchů se v současné době v elektrotechnické výrobě podílí až na 70% defektů.

Proto je důležité studovat a snažit se porozumět dějům probíhajícím při formování pájeného spoje. Jde především o děje na rozhraní pájky a pájeného materiálu a o děje probíhající v samotné pájce.

Technologický přechod na bezolovnaté pájení a jeho většinové rozšíření v elektrotechnické výrobě je důvodem k opětovnému zkoumání pájecího procesu v různých procesních a materiálových podmínkách.

Snahy o pochopení dějů, které při pájecím procesu probíhají vedou k vyvíjení modelů, které mohou předpovědět pájecí proces souborem vstupních parametrů a také naopak použít tyto modely pro optimalizaci parametrů za účelem zlepšení spolehlivosti elektronických zařízení.

K sestavení modelu je zapotřebí dobře daný jev prozkoumat. K čemuž nám nejlépe poslouží měření zvolených veličin a následně jejich vyhodnocení. Snahou je tedy vyvinout co nejméně náročnou metodu pro měření a vyhodnocování zvoleného děje.

Tato práce se zaměřuje na jednu ze zásadních veličin, které při pájení sledujeme a tím smáčení a roztékání kvaziomezeného množství bezolovnaté pájky na měděném povrchu plátovaného základního materiálu FR4 s různými povrchovými úpravami.

1 Teoretická část

Fyzikální podstatu pájení lze definovat jako fyzikálně - chemický proces, při kterém se při určité teplotě difúzně spojí roztavená pájka se základním materiálem. Při tomto ději se atomy spojovaných kovů a roztavené pájky dostávají do velmi malých vzdáleností, přičemž dochází k účinkům adhezních (přilnavých) a kohezních (soudržných) sil. Dochází také k difúzi a rozpouštění některých prvků pájky i spojovaných materiálů.

Pájka je označení přídavného materiálu, pomocí něhož se zhotovuje nerozebíratelné spojení dvou kovů. Na pájky jsou kladeny následující požadavky: musí mít nižší teplotu než spojované materiály, musí mít co nejmenší interval tavení, dobré pájecí vlastnosti – z technologických vlastností jsou nejdůležitější smáčivost, roztékavost a vzlínavost. Dále musí pájka obsahovat prvky, které mají s prvky pájených materiálů dobrou vzájemnou rozpustnost a difúzi, přičemž se nesmí tvořit křehké fáze, prvky pájky musí mít v kontaktu s pájenými materiály malý rozdíl elektrochemického potenciálu. Musí mít dobré mechanické vlastnosti, zejména pevnost a houževnatost.

1.1 Pájený spoj a jeho formování

Z fyzikálního a fyzikálně chemického hlediska musíme procesem pájení dosáhnout mechanicky pevného a dlouhodobě spolehlivého pájeného spoje, tj. vytvořit kvalitní i stabilní metalurgické spojení vývodů součástky s pájecími ploškami správnou volbou:

- materiálové kombinace: *povrchové úpravy pájených povrchů / tavidla / pájky*
- procesního systému: *teplota / doba / gradienty nárůstu a poklesu teploty*
- environmentálního systému: *vzduchu nebo řízené atmosféry/vakua*

Základní podmínkou pro vytvoření pájeného spoje je pájitelnost povrchů, což znamená, že tyto musí být smáčitelné pájkou. Smáčivost plochy je vlastnost vyjadřující schopnost vytvořit na jejím povrchu, při styku s roztavenou pájkou souvislou vrstvu pájecího materiálu. V případě pájení součástek musí mít pájka dobrou vzlínavost a přilnavost, aby se vytvořil na pájených materiálech po celém povrchu tuhý roztok v podobě tenké a souvislé vrstvy pájky. Tyto vlastnosti závisejí na složení pájky, a proto při přechodu na bezolovnaté pájení dochází ke změnám i ve smáčivosti, jež výrazně ovlivňuje nepřítomnost olova.

Během smáčení tuhého povrchu roztavenou pájkou se pájka roztéká po povrchu a zmenšuje volný povrch. Pájka postupně získá takový tvar, který má v daném systému minimální povrchovou energii. Smáčení je první fází vzájemného fyzikálně chemického působení atomů roztavené pájky na povrch spojovaného materiálu. Při smáčení začínají působit meziatomární síly. Na místech mezifázového rozhraní tak postupně vznikají vazby, které se rozšiřují po celé ploše styku. Dochází přitom ke snižování volné povrchové energie systému. Během procesu smáčení se dva volné povrchy roztavená pájka a tuhý kov mění v jedno mezifázové rozhraní. Na tomto mezifázovém rozhraní přechází atomy roztaveného kovu do mřížky tuhého kovu. Dochází ke spojování valenčních elektronů jednotlivých kovů a k vytvoření kovové vazby. Nevytvoří-li se na spojovaném kovu společná fáze, nedojde ani k odpovídající úrovni smáčení. V další fázi pokračuje difúze spojovaných kovů, která je úměrná teplotě. Většinou dochází i k rozpouštění spojovaných kovů. Ve třetí fázi dochází k chladnutí vytvořeného spoje a ke krystalizaci pájky. Začínají se vytvářet krystalizační zárodky a začíná růst zrn pájky. Velikost zrn závisí na rychlosti chlazení, přičemž při pomalém chlazení se vytváří větší zrna, která snižují spolehlivost spoje.

Pájení je tedy založeno na 3 aspektech:

- na metalurgii
- na termodynamických vlastnostech a chemii tekutého média
- na procesní technologii

1.2 Materiálový systém

1.2.1 Sn-Ag-Cu pájka a typy slitin

Pro měkké pájení se používají olovnaté i bezolovnaté pájecí slitiny. Z důvodů direktiv WEEE a RoHE došlo v elektrotechnickém průmyslu k přechodu na bezolovnaté pájení. Největší pozornost je soustředěna na systémy Sn-Ag-Cu (SAC). Tento systém zahrnuje čtyři nejčastěji používané pájky: Sn - 4 Ag – 0,5 Cu, Sn – 3,8 Ag - 0.7 Cu, Sn - 3.6 Ag - 0.5 Cu a Sn - 3.5 Ag - 0.7 Cu s teplotou tavení 217 °C – 219 °C. [2]

Technické specifikace se ve vlastnostech liší minimálně.

SAC slitiny mají výrazně větší povrchovou energii ve srovnání s SnPb a proto je smáčení rozdílných kovových povrchů kritičtější. Abychom překonali tento fyzikální nedostatek, je nutno zvýšit teplotu a dobu určenou k přetavení a tímto způsobem zlepšit proces smáčení.

1.2.2 Tavidlo

Tavidlo za spolupůsobení tepla napomáhá fyzikálně i chemicky k vytvoření spolehlivého pájeného spoje:

- reaguje s oxidy a nečistotami na spojovaném povrchu i pájce a brání reoxidaci povrchů
- odstraňuje reakční produkty z pájeného povrchu a umožňuje pájce dostat se do pracovní vzdálenosti s kovovými povrchy
- snižuje povrchové napětí pájecí slitiny a zvyšuje povrchové napětí pájeného povrchu; umožní tak pájce, aby se dobře roztekla
- zlepšuje přenos tepla od tepelného zdroje k pájenému místu

Pro bezolovnaté pájení s vyššími pracovními teplotami dochází k zásahům do formulace zejména bezoplachových tavidel, která mají malé „technologické okno“ - úpravy aktivačních teplot i časů. Všeobecně se používají stejné typy tavidel jako u olovnatých pájek. Preferují se bezoplachová tavidla (no clean) na bázi pryskyřic - ekologické i ekonomické důvody. Standardní členění tavidel dle základní tavidlové složky popisuje norma J-STD-004 tab. 1.1. Tavidla jsou převážně v kapalně a pastovité formě, značí se např. ROL0, ORL0 ORL1. [2]

Tab. 1.1 Členění dle ANSI J-STD-004 [2]

ZÁKLAD TAVIDLA	ZKRATKA	ÚROVEŇ AKTIVACE / % halogenidů/					
		L0	L1	M0	M1	HO	H1
		0	<0,5	0	0,5 - 2	0	> 2
přírodní pryskyřice	ROSIN RO	A	B	C	D	E	F
syntetické pryskyřice	RESIN RE	G	H	I	J	K	L
organické kyseliny	ORGANIC OR	M	N	P	Q	R	S
anorganické kyseliny	INORGANIC IN	T	U	V	w	X	Y

Reakce tavidel na bázi pryskyřic:

Tavidlo obsahuje vybrané mono a dikarboxylové kyseliny v koncentracích navržených pro stechiometrickou reakci s oxidy přítomnými na pájených površích. Pro usnadnění procesu smáčení se používají aktivátory v tavidle, které zajistí primární redukci oxidů. Jsou typicky na bázi alifatických a aromatických karboxylových kyselin, alifatických aminů a hydrochloridaminových solí. Vlastní pryskyřice v tavidle funguje jako druhý stupeň redukce

oxidů, řídí tixotropní a reologické vlastnosti, brání reoxidaci pájky během pájecího procesu a „zapouzdřuje“ pohyblivé ionizovatelné zbytky po procesu pájení.

Nízkozbytková tavidla se vyznačují nižší aktivitou tavidlových složek a tak mají i nižší schopnost chránit povrch pájky i pájený povrch před vnějšími i procesními oxidačními vlivy. [2]

1.2.3 Povrchová úprava měděného povrchu substrátu

Organický substrát jako nosný elektroizolační základní materiál, je jednostranně nebo oboustranně laminován fólií velmi čisté elektrolytické mědi. Měděný povrch substrátu se upravuje fyzikálně i chemicky, jako povrchová úprava pasivní. Čištěním pomocí rozpouštědel nebo mechanickou abrazí dojde k odstranění povrchových vrstev - zpravidla organických kontaminací, aniž by došlo ke změně chemie povrchu. Aktivní povrchová úprava mění funkční skupiny na měděném povrchu substrátu a tedy i chemismus povrchu. Používají se metody pokovování a metody pokrytí organickými povlaky.

Tenká vrstva kov – kov

Na povrch Cu se nejvíce aplikují kovové povlaky Sn a NiAu, které vytvářejí rovinné povrchy konstantní tloušťky a zajišťují velmi dobrou pájitelnost. U tavitelných povlaků musí mít vrstva odpovídající tloušťku vzhledem ke spojitému nárůstu netavitelných intermetalických sloučenin.

NiAu (ENIG)

NiAu povrch je stabilní a nepodléhá rychlému stárnutí. Tuto stálost zajišťuje vrstva Au a mezivrstva Ni. Ni se na měděný povrch nanáší chemicky v lázni, do které se přidává P. Vysoký obsah P však snižuje smáčivost. Au se nanáší imersně, bez přítomnosti elektrického proudu a redukčního činidla. Tento proces je ukončen, když je základní materiál zcela pokryt kovem. NiAu (Electroless Nickel Immersion Gold - ENIG) se ve zvýšené míře používá pro jemné (Fine Pitch) a velmi jemné (Ultra Fine Pitch) rozteče součástek v technologii povrchové montáže SMT (Surface Mount Technology).

Nevýhodou NiAu zejména u bezolovnatých pájek je výrazné rozpouštění zlata z povrchu plátovaného substrátu do formovaného spoje a vytváření křehkých intermetalických sloučenin AuSn_4 a AuSn_2 . Do 3 hm. % Au není jev výrazný. Ni bariéra brání růstu intermetalických fází na mezifázovém rozhraní. Silnější vrstva Au vykazuje horší smáčecí charakteristiky, povrch je drsnější a příp. může vykazovat nedostatečné množství

pájky ve spoji. U pouzder CSP (Chip Scale Package) bývá pozorováno křehnutí spoje, které je dáno přítomností fosforu na rozhraní chemicky naneseného povlaku NiAu. Spoje na NiAu jsou obecně křehčí a mohou mít i horší mechanické vlastnosti. [2]

Tenká vrstva organický povlak – kov

Při této metodě ochrany povrchu jsou na povrch nanášeny organické sloučeniny zabráňující oxidaci povrchu. Výhodou oproti předchozí metodě je menší tloušťka této vrstvičky.

OSP (Organic Solder Protectives)

Chemická metoda nanášení organických inhibitorů oxidace mědi na odkrytý měděný povrch substrátu, zpravidla po tisku nepájkivé masky. Používají se často látky na bázi benzoimidazolů, benzotriazolů i látky nové generace vhodnější pro bezolovnatý pájecí proces. Vrstvy jsou fixovány k povrchu slabými Van der Waalsovými silami. Nevýhodou OSP je kratší doba garantované skladovatelnosti i problematické vícenásobné teplotní expozice. [2]

1.3 Smáčivost tuhých povrchů roztavenou pájkou

Samotná roztavená pájka má vlastnosti jako kapalina, to znamená, že v důsledku existence malých středních vzdáleností mezi molekulami působí relativně velké přitažlivé síly. Vlivem toho se snaží pájka zaujmout kulový tvar, protože koule je těleso, v kterém je při daném objemu nejmenší střední hodnota vzájemných vzdáleností libovolných dvojic bodů, to znamená nejmenší povrch.

Roztavená pájka se chová jako by byl její povrch tvořen tenkou napnutou blánou snažící se neustále o zmenšování celkového povrchu. Síla působící v tomto smyslu na délkovou jednotku se nazývá povrchové napětí. Je vždy kolmá na délku, na které působí. Obrys povrchu pájky se snaží zaujmout rovnovážný stav odpovídající minimální hodnotě energie nahromaděné v povrchu pájky (tzv. povrchové energie).

Přijde-li roztavená pájka do styku s pájecí plochou, pak v důsledku smáčivosti dochází k interakci povrchového napětí v pájce s povrchovým napětím vznikajícím mezi pájkou a pájecí plochou. Je-li povrch smáčivý, je adhezní konstanta kladná, nastává kapilární elevace a tvar menisku je dutý (v případě nesmáčivosti naopak vypouklý).

Smáčivost je ovlivňována kromě typu a povrchové úpravy smáčeného materiálu celou řadou dalších faktorů, jako je např. složení pájecí slitiny a obsah nečistot, drsnost pájených povrchů, stupeň oxidace pájených ploch apod.

Dobrá smáčivost povrchu roztavenou pájkou je prvním předpokladem pro vytvoření kvalitního pájeného spoje. Povrchy musí být čisté, suché, zbavené nečistot, aby mohl proběhnout proces smáčení. Úroveň drsnosti povrchu funguje jako promotor mechanické pevnosti fyzikální i chemické vazby. Smáčivost povrchu je závislá na následujících faktorech:

- složení a vlastnosti pájky
- povrchová úprava substrátu, materiál substrátu
- složení a aktivita tavidla
- pájecí proces, definované teplotně časové charakteristiky a parametry zajišťující přenos tepla k pájenému spoji
- pájecí atmosféra (vzduch/dusík/vodík)

1.3.1 Druhy smáčení povrchu

Proces smáčení může probíhat bez nebo s chemickou reakcí na rozhraní. Jedná se potom o fyzikální nebo chemické smáčení.

- *fyzikální smáčení* - ve své podstatě je to adhezní spojení, např. u Pb-Cu. Při smočení povrchu roztavenou pájkou neproběhne chemická reakce na rozhraní a nedojde ke změně chemického složení. Adhezní spoj má menší pevnost ve smyku a v ohybu, ale dobrou elektrickou vodivost.
- *chemické (reaktivní) smáčení* - dojde k vytvoření společné fáze na rozhraní liquidu a solidu procesy rozpouštění nebo difúze, tj. musí zde dojít k vytvoření tuhého roztoku nebo intermetalické fáze, přičemž vzájemná rozpustnost kovů může být jen nepatrná. Vzniká přechodová oblast určité tloušťky.

1.3.2 Podmínky pro smáčení [2]

Během smáčení tuhého povrchu roztavenou pájkou působí na rozhraní mezi fázemi nevykompenzované meziatomární síly. Tyto nevykompenzované povrchově aktivní síly jsou mírou povrchové energie, mezifázové energie i mezifázového povrchového napětí. Smáčením minimalizujeme volnou povrchovou energii postupným roztékáním pájky po povrchu

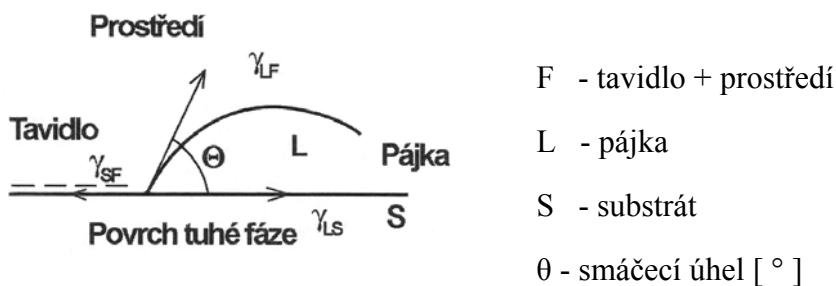
a kompenzací atomů s volnými povrchovými vazbami. Rozhraní se stane stabilním, pokud se dosáhne minimální potenciální energie.

Podmínky smáčení mohou být popsány z termodynamického pohledu pomocí tzv. koeficientu roztékání S_p na mezifázovém rozhraní L, S, F vztahem (1) dle [15].

$$S_p = - \left(\frac{\partial G}{\partial A} \right)_{p,T} = \gamma_{SF} - (\gamma_{LS} + \gamma_{LF} \cos \Theta) \text{ [N.m}^{-1}\text{]} \quad (1)$$

Pro termodynamickou rovnováhu mezifázových povrchových napětí pájky na povrchu substrátu, tedy pro stav smočení povrchu pájkou bez roztečení pájky po povrchu, kdy platí $\Delta G = 0$ a tedy $S_p = 0$ platí Youngova rovnice (2), viz obr. 1.1.

$$\gamma_{SF} = \gamma_{LS} + \gamma_{LF} \cos \theta \quad (2)$$



Obr. 1.1. Rovnováha povrchových napětí [2]

γ_{LF} - povrchové napětí na rozhraní LF [N.m⁻¹]

γ_{SF} - povrchové napětí na rozhraní SF [N.m⁻¹]

γ_{LS} - povrchové napětí na rozhraní LS [N.m⁻¹]

Z rovnice je zřejmé, že čím menší je γ_{LF} - povrchové napětí na rozhraní FL a čím větší je γ_{SF} - povrchové napětí na rozhraní SF, tím lepší je smočení povrchu roztavenou pájkou.

Dostanou-li se působící mezifázová napětí do rovnováhy, pak se určuje rozdíl mezi složkami, které nelze změřit, tj. dle (3).

$$\gamma_{SF} - \gamma_{LS} = \gamma_{LF} \cos \theta \text{ [N.m}^{-1}\text{]} \quad (3)$$

Z této rovnice lze určit podmínky pro smočení povrchu. Musí platit $\theta < 90^\circ$. Z výše uvedené rovnice tedy dostáváme podmínku (4) pro smočení povrchu:

$$\gamma_{SF} > \gamma_{LS} \quad (4)$$

Ke smáčení/roztékání dochází, je-li volná energie nově formovaného systému po smáčení menší, než před smáčením, tzn. aby roztavená pájka smáčela povrch substrátu, musí mít povrch substrátu větší povrchovou energii než roztavená pájka. Z pohledu tohoto požadavku: čím nižší povrchová energie roztavené pájky, tím snadnější je smáčení. Tavidlo maximalizuje povrchovou energii kovového povrchu substrátu ve spojení s odpovídající chemickou i následně metalurgickou reakcí.

Díky těsné atomární vazbě je na rozhraní pájky a substrátu jen malý přechodový odpor a současně existuje velká adhezní síla. Těsný tepelný kontakt zahajuje vlastní pájecí proces. Vytváří se chemická vazba (vše za předpokladu dobré pájitelnosti) pomocí chemické reakce mezi pájecím materiálem a substrátem reaktivní smáčení, což je ve své podstatě - termodynamický jev ireverzibilní obr. 7.

1.3.3 Smáčecí charakteristiky

Aby došlo ke správnému smočení tuhého povrchu roztavenou pájkou, musí být použité materiály i procesy slučitelné (kompatibilní) , pájka i spojované povrchy materiálů dostatečně smáčivé roztavenou pájkou a musí být i na odpovídající pracovní teplotě. Pájka se roztéká po povrchu, dokud nedosáhne optimálního energetického stavu. Úroveň smočení povrchu pájkou je podmíněna velikostí aktivních rozhraní i energetickými předpoklady. Smáčivost je definována pomocí faktoru roztékavosti - tzv. kontaktním (smáčecím) úhlem θ .

Smáčecí charakteristiky lze hodnotit ve statickém režimu, tj. v ustáleném stavu a v režimu dynamickém, tj. za procesu smáčení. Smáčecí charakteristiky jsou výslednicí jednotlivých působících sil mezifázového povrchového napětí. Smáčivost (smáčecí doba, smáčecí síla, smáčecí stres, roztečení při smáčení) je ovlivněna viskozitou, hustotou, povrchovým napětím, typem povrchové úpravy, morfologií povrchu, okolní atmosférou.

Spolehlivost pájeného spoje a smáčivost

Spolehlivost pájeného spoje je obvykle spojována se smáčivostí spojovaných povrchů a dílčí schopností udržet si tuto vlastnost. Smáčivost je komplexní jev, který závisí na materiálových charakteristikách a procesních podmínkách a u kterého existuje odpovídající

termodynamická hnací síla, zajišťující rychlé smočení rozhraní. Kinetika smáčení i afinita pájky k povrchu musí zajistit vytvoření vazeb, jejichž doba formování je přijatelná pro výrobní proces.

Ačkoliv kvalitní smáčení je nezbytné pro úspěšný pájecí proces, korelace mezi kvantitativní úrovní smáčení a kvalitou pájení není dostatečně prokázána. Nedostatečné pochopení termodynamiky i kinetiky procesu smáčení brání predikci i interpretaci vlastností bezolovnatých pájecích slitin v elektronické výrobě i výrobních procesech [2].

1.4 Smáčení a roztékání pájky po povrchu

Smáčení tuhého povrchu substrátu roztečenou pájkou probíhá pouze tehdy, je-li povrchová energie substrátu vyšší než povrchová energie liquidu. Je to nezbytná, ale ne postačující podmínka pro smáčení. Aby došlo k procesu smáčení, musí být pájka ve vzájemném kontaktu se smáčeným povrchem a musí být i na odpovídající pracovní teplotě. Pro smáčení musí být dosažena minimální, tzv. smáčecí teplota tuhého povrchu, která musí být rovna teplotě solidu pájky u materiálu s dobrou tepelnou vodivostí. U materiálu se špatnou tepelnou vodivostí může být tato teplota až o 25 % nižší, než je solidus pájky [2], kdy dojde ke smáčení, aniž by došlo k roztečení pájky. Empiricky bylo zjištěno, že tekutá pájka smáčí tuhý povrch lépe, pokud dochází k rozpouštění nebo formování intermetalické fáze (IMC) [7]. Pro pájení je nutné i tečení pájky, proto musí být teplota pájeného povrchu nad solidem, ale i nad liquidem. Znalost povrchových energií kovů je důležitá pro formaci pájených spojů.

1.4.1 Metody zlepšení smáčivosti povrchů

Neuvažujeme-li pájení v ochranné atmosféře existují dva hlavní způsoby, jak zlepšit smáčivost pájeného povrchu při daném materiálu pájky:

- zvýšit teplotu pájení
- zvětšit aktivitu tavidla

Zvyšování teploty není zpravidla vhodné z důvodů použitých materiálů. Maximální teplota je limitována materiálem substrátu a součástky. Při zvyšování teploty sice dochází ke snížení povrchového napětí pájky, ale dochází k růstu oxidů na pájených plochách i na vlastním povrchu pájky, což zase nepříznivě ovlivňuje smáčivost. Lepší cestou je hledání

rovnováhy mezi aktivitou tavidla a množstvím zbytků. Další vývoj tavidlové chemie však stále přispívá k snižování zbytků tavidla při zvyšování jeho aktivity.

1.4.2 Dynamický kontaktní úhel [2]

Na kontaktní úhel nelze pohlížet jen ze statického pohledu, tj. za ustáleného stavu. Dynamický kontaktní úhel se během roztékání pájky po povrchu mění a jeho hodnota závisí na rychlosti, se kterou se linie rozhraní mezi třemi fázemi pohybuje dopředu nebo zpět po povrchu. Pochopení dynamického kontaktního úhlu vyžaduje detailní hydrodynamickou analýzu. Základním bezrozměrným parametrem, který charakterizuje rychlost pohybu kontaktní linie (TPL - Tripple Point Line) je kapilární číslo C_A , které představuje relativní důležitost viskózních sil k mezifázovému povrchovému napětí. Výsledkem je tvar volného povrchu na kontaktní linii [2].

$$C_A = \frac{\mu U}{\gamma_{LF}} \quad (5)$$

U - rychlost toku pájky

μ - viskozita

γ_{LF} - mezifázové povrchové napětí

Hydrodynamické efekty dominují v případě malých kontaktních úhlů a pomalých rychlostí toku pájky, zatímco molekulární efekty jsou důležité u velkých kontaktních úhlů, rychlost roztékání je také velká [2].

V dnešní době je velmi populární metoda analýzy založená právě na sledování pohyb TPL a vyhodnocování rychlosti tohoto pohybu se ukazuje jako velmi zajímavé pro studium dynamiky formování pájeného spoje.

1.4.3 Povrchové napětí liquidu kovových prvků a kohezní energie [2]

Povrchové napětí roztavené pájky je klíčovým parametrem ve vztahu ke smáčení a pájitelnosti. Na volném tekutém povrchu, který se chová jako tenká elastická vrstva působí asymetrické silové pole a tento povrch vykazuje jistou povrchovou energii. Povrchové napětí liquidu γ_{LF} je termodynamická veličina a je rovno množství práce potřebné k izotermálnímu zvětšení plochy liquidu. Platí téměř lineární závislost snižování povrchového napětí kovového prvku γ_T ve vztahu k teplotě, platí vztah (6)

$$\gamma_T = \gamma_M + \frac{d\gamma}{dT}(T - T_M) \quad (6)$$

Kde	T_M	-	teplota tavení	[K]
	γ_M	-	povrchové napětí při teplotě tavení	[N.m ⁻¹]
	$\frac{d\gamma}{dT}$	-	teplotní změna povrchového napětí	[N.m ⁻¹ K ⁻¹]

Mezi T_M a γ_M platí empirická korelace (7):

$$\gamma_M \approx \frac{T_M}{V_M^{\frac{2}{3}}} \quad (7)$$

kde V_M je molární povrchová plocha při teplotě tavení [m².mol⁻¹]

Povrchové napětí tekutého kovu je v korelaci s inverzním atomovým objemem.

Se vzrůstající teplotou tavení kovů se zvyšují i vazební síly v kovech a proto mají i vyšší povrchové napětí. Výjimkou je vyšší povrchové napětí u Sn a nižší u Pb.

Z mikroskopického pohledu má povrchové napětí liquidu i viskozita původ ve stejných meziatomových silách a platí dle [20] vztah (8).

$$\mu = \frac{16}{15} \gamma \sqrt{\frac{m_A}{kT}} \quad (8)$$

kde μ - viskozita [kg.m⁻¹s⁻¹]

m_A - atomová hmotnost [kg]

1.4.4 Povrchová energie solidu kovu a adhezní energie

Povrch solidu lze charakterizovat volnou povrchovou energií. Volná povrchová energie kovu závisí jak na fyzikální historii povrchu, zejména na deformacích a změnách krystalové struktury, tak i na fyzikálně chemickém stavu povrchu charakterizovaným zejména povrchovým napětím solidu. Výpočet povrchové energie kovu lze provést dvěma metodami - jednodušším postupem přes stanovení výparné energie, druhá metoda je pomocí kvantově mechanického modelu. [2]

Ve vztahu ke smáčení a roztékání pájky po povrchu, lze povrch charakterizovat tzv. adhezní energií. Adhezní energie E_{AD} je definována jako práce potřebná k oddělení jednotkového rozhraní mezi solidem a liquidem na dva rozdílné povrchy. Je-li plocha mezifází rovna 1 m^2 , je adhezní práce rovna spoučtu povrchových napětí čistých fází zmenšenému o mezipovrchové napětí, které charakterizuje velikost adhezních sil mezi dvěma fázemi, dle [2] platí vztah (24).

$$E_{AD} = \gamma_{SF} + \gamma_{LF} - \gamma_{SL} \quad (9)$$

Chemické reakce povrchu s okolím

K chemické adsorpci dochází buď přímo reakcí lehkých prvků s povrchem za vzniku vrstev oxidů a sulfidů, nebo po procesu difúze. Difúzí z materiálu se některé prvky dostávají na povrch a zde reagují. Jejich vazba k povrchu se mění od slabé až po silnou v případě, že na povrch difundující látka reaguje s okolím. Vzájemnou difúzí mezi pevnými fázemi vzniká i mezifázová oblast, která může obsahovat kontaminační a segregační vrstvy [2].

Výsledkem adsorpčních jevů je snížení povrchového napětí, neboť povrchové napětí oxidů je výrazně nižší než hodnoty korespondujících kovů [2]. Vrstva tuhého oxidu na povrchu tak omezuje smáčení a roztékání pájky. Odstraněním oxidů chemicky pomocí tavidel zvýšíme povrchové napětí γ_{SF} a zlepšíme tak smáčení povrchu charakterizované zmenšením smáčecího úhlu.

1.4.5 Tavidlo a interakce

Tavidlo reaguje s oxidy a nečistotami na spojovaných i spojujících površích a brání jejich reoxidaci. Tavidlo tak snižuje povrchové napětí slitiny na rozhraní tekutá pájka/okolní atmosféra [6]. Přidání aktivátorů do tavidla dále snižuje toto povrchové napětí. Používání no clean tavidel s malým množstvím sušiny vede ke zvýšené oxidaci povrchu pájky.

Efekt odstraňování oxidového filmu z povrchu roztavené pájky už není tak jasný, neboť experimentálně bylo zjištěno, že zoxidovaná pájka se lépe roztéká, než pájka bez oxidů [6].

Degradace tavidla

Působením environmentálních vlivů, zejména kyslíku, zvýšené teploty i vlhkosti v časové ose dochází k postupnému znehodnocování tavidla a zhoršování jeho vlastností. Vznikají problémy oxidační, polymerizační i izomerizační.

K oxidaci tavidla dochází při jeho expozici na vzduchu a během kontaktu s oxidovanými kovovými povrchy. Dvojně vazby v tavidle oxidují a vytváří peroxidy, hydroxidy a keto sloučeniny. Tyto oxidované pryskyřice jsou méně aktivní při reakci s oxidy kovů a jsou i méně rozpustné v rozpouštědle než původní pryskyřice. Oxidace se zvyšuje působením teploty, stejně jako rychlost polymerizačních a izomerizačních pochodů v tavidle.

Během polymerizace se dva nebo více stejných monomerů nebo polymerů spojují do větších molekul, s vyšší molekulovou hmotností. Přírodní pryskyřice se může začít měnit už při teplotě pod 145 °C. Kritická fáze v polymerizačním procesu začíná, když se tavidlo dostává teplotně do oblasti pájení. Při teplotách nad 250 °C jsou již většinou katalyzovány aktivátory, které ovlivňují rychlost polymerizace.

Izomerizací dochází k transformaci jedné substance v tavidle do druhé. Obě mají stejné chemické složení, ale jinou strukturu. Izomerizace se zvyšuje teplem a přítomností kyselin derivovaných z aktivátoru. Během ohřevu pryskyřičné složky izomerizují a dochází k vytváření rozdílných chemických druhů s unikátními parametry rozpustností.

1.5 Děje probíhající na mezifázovém rozhraní

Nevytvoří-li se na spojovaném kovu společná fáze, nedojde ani k odpovídající úrovni smáčení.

Intermetalická fáze je homogenní substance sestávající ze dvou nebo více kovů. Na rozdíl od intermetalické sloučeniny nemá intermetalická fáze pevně daný stechiometrický poměr komponent. Jako fázová tolerance jsou označovány poměry mezi jednotlivými komponenty intermetalické fáze, ve kterých se obsah jednotlivých kovů pohybuje.

Struktura a typ atomové mřížky intermetalické fáze se často značně odlišuje od původní struktury zúčastněných kovů. Důvodem je existence různých chemických vazeb (kovová, iontová, kovalentní, atd.) v intermetalické fázi. Tyto látky mají zpravidla technicky zajímavé vlastnosti jako pevnost, magnetické vlastnosti, stabilitu za vysokých teplot, supravodivost, atd. Na druhé straně jsou většinou těžko opracovatelné a křehké.

Během procesu smáčení a roztékání pájky po povrchu, je mezikovové rozhraní nahrazováno více či méně spojitou přechodovou tzv. intermetalickou zónou (IMC). Ke vzniku intermetalické oblasti dochází procesy rozpouštění i difúze. Na rozhraní mezi kovy se formují chemické a fyzikální vazby.

1.5.1 Difúze pájky do tuhého kovu základního materiálu [2]

Difúzní procesy v pevných kovech závisí zpravidla na typu a nepravidelnosti stavby krystalové mřížky. Součinitel difúze vzrůstá se zvyšováním hustoty poruch krystalové mřížky. Hustota vakancí a dislokací, velikost zrna a množství pružných deformací v kovu závisí na způsobu výroby kovu a na jeho mechanickém, tepelném eventuelně i chemickém opracování. S poruchami krystalické mřížky kovu souvisí i velikost součinitelů povrchové difúze, objemové difúze i difúze po hranicích zrn. Čím jsou při difúzi vzájemné síly mezi atomy difundujících prvků menší, tím menší je i aktivační energie a tím větší je součinitel difúze a tedy i její rychlost. Součinitel difúze závisí i na velikosti difundujícího prvku, teplotě tavení difundujícího prvku, v případě slitiny i na vlastní koncentraci prvku ve slitině.

Difúzní zóna se začíná vytvářet v okamžiku zahájení smáčení tuhého povrchu roztavenou pájkou. Hnací silou je koncentrační gradient. Difúzní tok tekuté pájky, která difunduje přes průřez A po dobu t ze strany s vyšší koncentrací do strany s nižší koncentrací je úměrný koncentračnímu gradientu. Difúze vždy zahrnuje transport hmoty. Pro tloušťku vytvořené difúzní vrstvy Z_0 po době pájení t z II. Fickova zákona platí:

$$Z_0 = \sqrt{Dt} \quad (10)$$

Kde Z_0 - tloušťka IMC [m]

D - součinitel difúze [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

t - čas [s]

Difúzní rychlost i tloušťka vytvořené difúzní vrstvy je dána pájecím procesem i volbou spojovaných a spojujících materiálů. Výsledkem difúzního procesu z termodynamického pohledu je i dosažení minimální volné entalpie.

Ze základních rovnic difúze byla empiricky stanovena Arrheniova rovnice

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (11)$$

kde D_0 - difúzní koeficient [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

Q - aktivační energie růstu IMC [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]

R - plynová konstanta 8,314 [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

T - teplota [K]

Součinitel difúze D se zvyšuje exponenciálně se zvyšující se teplotou. Nadměrný růst Z_0 je během pájení způsoben vyšší teplotou i delší dobou pájení. Uvedená rovnice platí pro difúzi v čistých kovech.

U vícesložkových pájek, kdy jednotlivé prvky mohou vytvářet tuhé roztoky, eutektické směsi a intermetalické sloučeniny, probíhá difúze v několika fázích a rovnice může být modifikována. Vzhledem k tomu, že součinitele difúze mají v různých podmínkách různou hodnotu, určuje se zpravidla hloubka difúzní vrstvy, která se tak používá pro hodnocení charakteru a rychlosti difúze.

Z pohledu pájitelnosti, zejména smáčivosti je difúze pozitivní jev, na druhé straně však difúze vede k vytváření intermetalických sloučenin. Tato „vrstva“ funguje jako bariéra, která zhoršuje zejména mechanické i elektrické vlastnosti spoje.

U některých typů spojů dochází i k tzv. elektrochemické korozi, kde jako elektrolyt funguje tekutá pájka. Pájka se dostane mezi zrna tuhého kovu a tím se poruší jeho soudržnost. Problém v některých případech souvisí s velkou rozpustností pájky, resp. některých jejích prvků v základním materiálu, vysokou pracovní teplotou i délkou pájecího procesu. Postupně v teplotně - časové ose dochází ke zhoršování homogenity i adheze spoje, což může vést až k destrukci spoje.

Kromě výše uvedené difúze během procesu pájení dochází na pájeném spoji k difúzi i po pájecím procesu. Během tepelného namáhání dochází k dalšímu pokračování růstu IMC.

1.5.2 Intermetalická oblast a vliv na pevnost spoje

Vytváření a růst intermetalické vrstvy (IMC) na rozhraní mezi materiálem substrátu a pájecí slitinou ovlivňuje spolehlivost pájeného spoje. Na straně jedné je jejich přítomnost nezbytná, tím, že často vznikají v procesu chemického, tj. reaktivního smáčení povrchu, zajistí vyšší pevnostní charakteristiky formovaného spoje. Na straně druhé jsou IMC vrstvy podstatně křehčí než základní kov a pokud jsou přítomny ve větší míře, redukuje životnost pájeného spoje. Pro sledování spolehlivosti je nutné znát vliv materiálových a procesních parametrů na tloušťku a strukturu intermetalické vrstvy. Smáčivost povrchů, vlastnosti pájky i charakteristika pájecího procesu tak předurčují správné formování i pevnost pájeného spoje. Dobré smáčecí vlastnosti rozhraní jsou u SnPb eutektické a většiny LF pájek s nadbytkem cínu, který se vyznačuje snadnou adhezí ke kovovým povrchům, přičemž se vytváří tenká vrstva IMC. [7] uvádí potřebu vybudování směsných krystalů pro zajištění silných vazeb, protože ty zajišťují optimální adhezní pevnost a výbornou elektrickou vodivost. Formování

směsných krystalů u vhodných materiálových kombinací probíhá od mezní k jisté koncentrační úrovni a závisí na pracovní teplotě. [2]

Tloušťka, mikrostruktura a morfologie IMC má výrazný vliv na pájitelnost, negativně ovlivňuje křehkost IMC, tím i pevnost a spolehlivost pájeného spoje. Studie [7] dokázaly, že smáčecí vlastnosti intermetalické zóny jsou více dány její krystalickou strukturou, tj. průměrem krystalitů, než její jmenovitou tloušťkou. Pro sledování spolehlivosti spoje je tedy lepším kritériem měření průměru krystalitů než sledování tloušťky IMC. [2]

Pájeným spojem jsou kompenzovány rozdíly v teplotních součinitelích délkové roztažnosti (TCE) spojovaných materiálů a tyto pevnostní vlastnosti IMC jsou nezbytné, aby tangenciálně absorbovaly různé TCE. Nekvalitní vytvoření vazeb na rozhraní mezi pájkou a pájeným povrchem, teplotní cyklování a mechanické namáhání spoje vede ke snižování spolehlivosti pájeného spoje. Stárnutí spoje a difúzní procesy v IMC vedou k další degradaci životnosti pájeného spoje, snížení pevnosti pájeného spoje i kvality elektrického kontaktu.

1.5.3 IMC u bezolovnatého pájení

Bezolovnatým pájecím procesem dochází k vytvoření silnější IMC vrstvy ve srovnání s olovnatou pájkou. Je to dáno obsahem Sn ve slitině SAC, vyšší pájecí teplotou případně i delší dobou pájení. Rychlost růstu IMC vrstvy u slitiny SAC je vyšší než u Sn63Pb37.

Spolehlivost spoje s bezolovnatou pájkou SAC však nemusí být menší než u slitiny SnPb.

Cu s OSP

U pájení přetavením Cu s povlakem OSP slitinou SAC vzniká okamžitě na rozhraní IMC složení Cu_6Sn_5 . Po umělém stárnutí se IMC vrstva stává silnější a více uniformní.

Mikrostruktura pájky ve spoji na Cu obsahuje Cu_6Sn_5 s velkými částicemi v disperzní eutektické fázi, která se skládá z malých Ag_3Sn a Cu_6Sn_5 částic v cínové matici. Po procesu pájení přetavením množství Cu v IMC oblastech dosahuje 4,5 hm. %. [2]

NiAu (ENIG)

Na povlaku ENIG okamžitě po rozpuštění Au v SAC pájce vstupuje do reakce pájka SAC s Ni vrstvou. Na mezifázovém rozhraní vzniká nejčastěji uváděná ternární IMC $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$, která je velmi tenká po pájení přetavením a během teplotního stárnutí pomalu roste do konečné konstantní tloušťky 4 μm - 5 μm , bez ohledu na velikost teploty. Tento jev

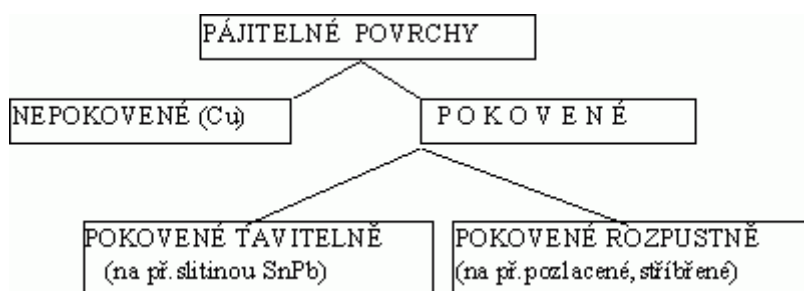
je zřejmě způsoben vrstvou Ni, která zablokuje rozpouštění Cu ze substrátu. K rozhraní pájky se substrátem migruje jen Cu z pájky.

IMC Cu_6Sn_5 je obsažena i v mikrostruktuře pájky a zvětšuje pevnost spoje. Velikost Cu_6Sn_5 částic je malá na rozdíl od IMC na povlacích OSP. Lze tedy předpokládat, že větší velikost IMC OSP je dána rozpouštěním Cu ze substrátu do pájky. Pájka má během teplotního cyklování horší přizpůsobivost, která negativně ovlivňuje spolehlivost. Ve slitině pájky po pájení se vyskytuje menší množství dutin (voidů), než na jiných povlacích.

Predikce efektů a chování IMC v rozdílných materiálových kombinacích je předmětem intenzivního výzkumu. [2]

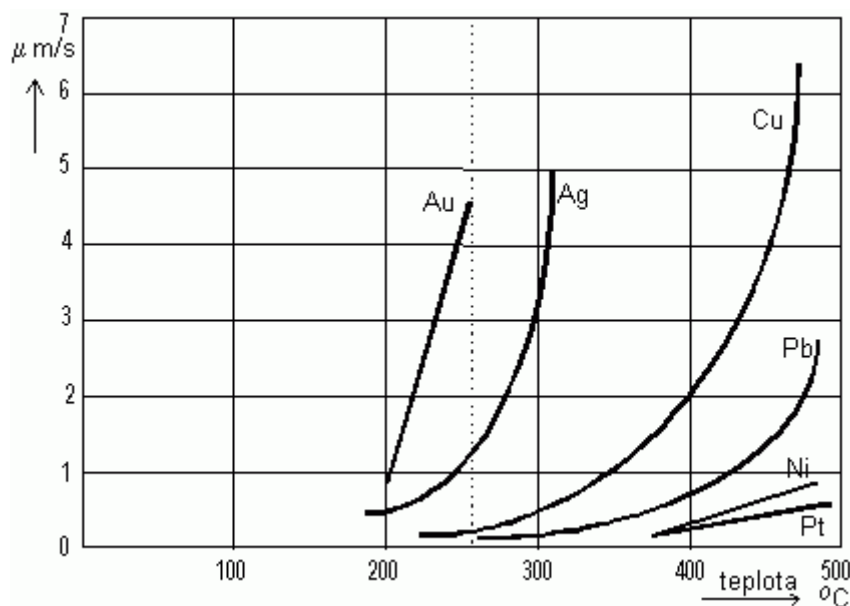
1.6 Rozpustnost kovů

Pájitelné povrchy lze rozdělit na pokovené a nepokovené. Nepokovené jsou tedy přímo základní kovy, nejčastěji měď (Cu), ale také mosaz, železo (Fe), hliník (Al) a podobně. Pokovení základního kovu může být buď tavitelné nebo rozpustné.



Obr. 1.1 Schématické rozdělení typů pájitelných povrchů

Rozpustnost kovů v tekuté pájce klesá dle stejné řady jako v případě již uvedené pájitelnosti. Mezi oběma jevy je vzájemná závislost.



Obr. 1.2 Závislost rychlosti rozpouštění vybraných kovů v klidné lázni na teplotě lázně

Z uvedeného grafu je patrné, že drahé kovy, zlato a stříbro, se při obvyklé pracovní teplotě pájecí lázně (cca 260 °C) velmi rychle rozpouštějí již při krátkém styku, v trvání kolem 5 s, s roztaveným kovem - pájkou.

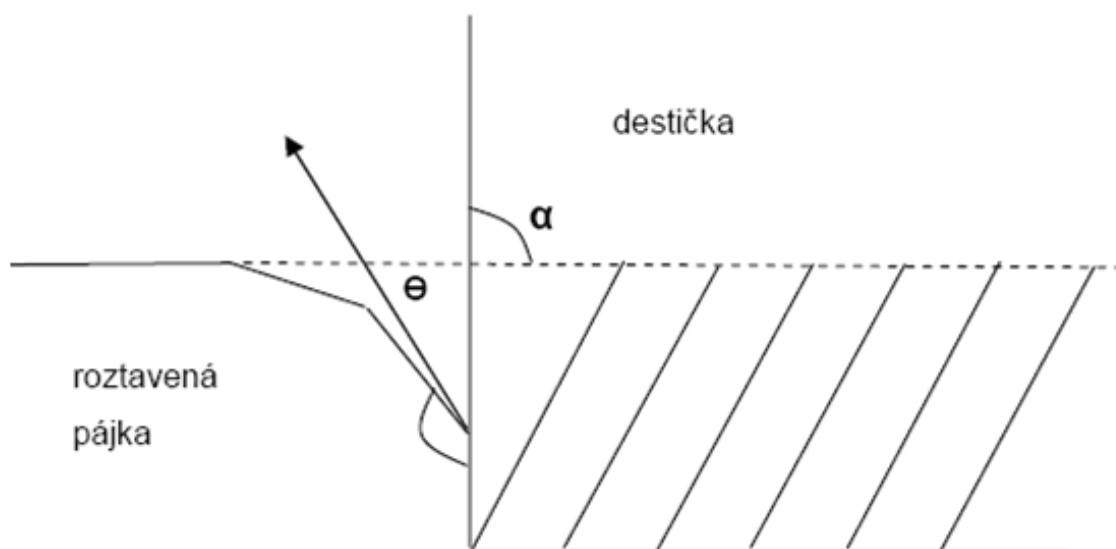
Lze odvodit, že pokovení zlatem o síle 20 μm v lázni tekuté pájky při teplotě 260 °C po pětisekundovém průchodu zcela zmizí. Fenomén rozpustnosti je i příčinou známého ubývání měděných hrotů pájedel. U profesionálních výrobků jsou hroty vždy povrchově upraveny tak, aby byly vůči pájce rezistentní. Nutno však poznamenat, že v tomto ohledu nepříznivá vlastnost rozpustnosti kovů je eliminována v případě pájení v technice povrchové montáže metodou přetavením ("reflow"), u které se používá definovaného minimálního množství pájecího prostředku nejčastěji ve formě pájecí pasty a nedochází k rozpouštění pájeného kovu, z toho důvodu, že v omezeném množství roztavené pájky dojde rychle k nasycení rozpouštěným kovem. Rozpustnost specifického kovu může být snížena také přidavkem téhož do slitiny pájky.

1.7 Měřicí metody

1.7.1 Metoda smáčecích váh

Metodou rovnováhy smáčení se zjišťuje smáčivost součástek a povrchů. Využívá se rychlého ponoření, nebo stacionárního módu. Ve stacionárním módu je vzorek ponořen takovou rychlostí, že se během ponořování nesmočí nebo smočí velice málo. Po dobu ponoření vzorku v lázni jsou sledovány vertikální síly. Na Obr. 1.3 je znázorněna plochá destička ponořená do roztavené pájky na začátku testu. Destička je ponořena do pájky rychlostí $20 - 25 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Během ponoření působí na destičku Archimédova vztlačková síla, která je úměrná objemu ponořené části vzorku. Tato síla vytlačuje destičku z roztavené pájky. Destička je ponořena do pájky pod úhlem α .

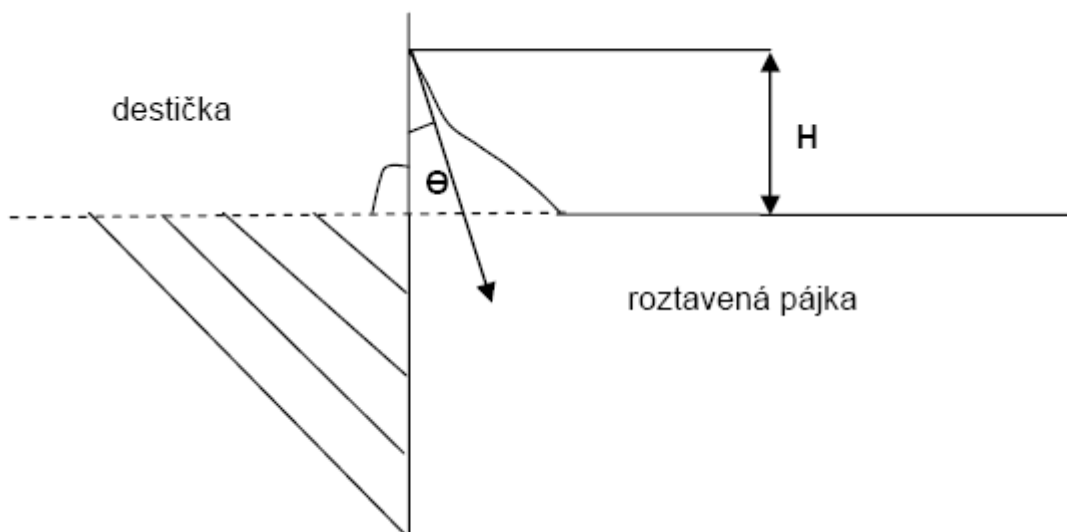
Na Obr. 1.3 ještě nezačalo smáčení povrchu roztavenou pájkou. Povrchové napětí γ působí tečně k povrchu pájky pod úhlem Θ mezi pájkou a povrchem destičky. Kontaktní úhel Θ je měřen uvnitř roztavené pájky.



Obr. 1.3 Smáčení povrchu destičky v pájce (nesmáčení)

Po chvíli začne pájka stoupat po povrchu destičky až do doby, než se znovu vytvoří horizontální hladina na povrchu pájky. V tomto bodě působí povrchové napětí pájky horizontálně po povrchu pájky a nemá vertikální složky. Nicméně stále působí Archimédova síla. V tuto dobu je to jediná vertikální síla působící na destičku.

Na Obr. 1.4 je vidět vertikálně ponořená destička na konci testu, kdy je zapájení kompletní. Povrchová síla působí směrem dolů. Vtahuje destičku do pájky. Pájka vystoupá po vzorku do výšky H , jak je naznačeno na Obr. 1.4. Výška navzlínané pájky a tedy i smáčecí síla závisí na pájitelnosti destičky. Tato síla je měřena testem rovnováhy smáčení. Maximum navzlínání je teoreticky určeno povrchovým napětím a hustotou roztavené pájky.



Obr. 1.4 Smáčení povrchu destičky v pájce (smáčení)

Test zaznamenává změnu vertikálních složek povrchového napětí během pájení. Rovnováha smáčení vyhodnocuje změnu kontaktního úhlu mezi pájkou a destičkou v čase. Vertikální síly jsou úměrné kosinu kontaktního úhlu. Tyto vertikální síly můžeme vyjádřit rovnicí.

$$F = \gamma \cdot p \cdot \cos \Theta - g \cdot \rho \cdot V \quad (12)$$

kde

Frovnovážná smáčecí síla (N).

γpovrchové napětí roztavené pájky pod tavidlem ($N \cdot m^{-1}$).

pobvod vzorku (mm).

ggravitační zrychlení 9,81 ($m \cdot s^{-2}$).

Vobjem ponořené části vzorku (m^3).

Θkontaktní úhel.

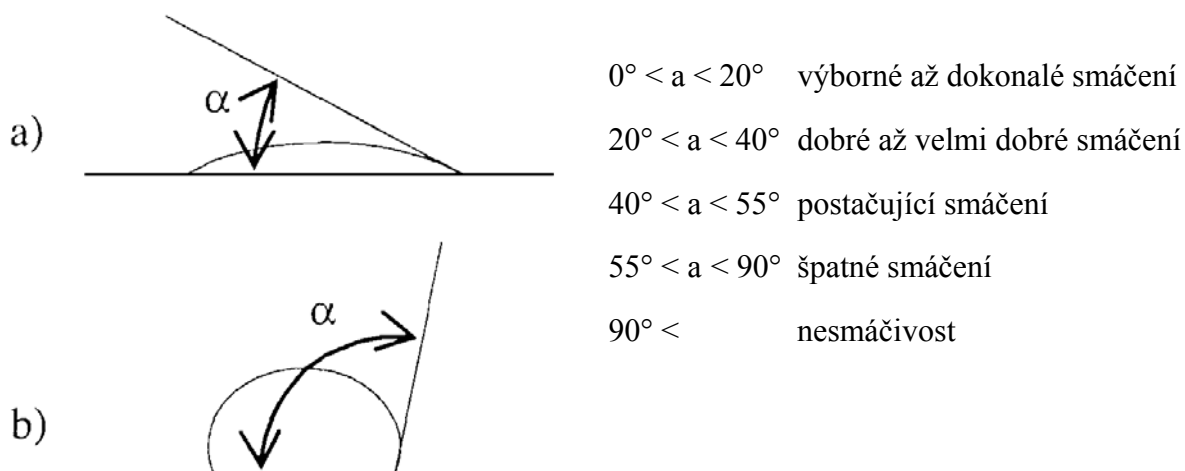
Hodnoty na pravé straně rovnice po znaménku $- (g \cdot \rho \cdot V)$ jsou určeny objemem vytlačené pájky a jsou během testu konstantní. Smáčecí síla je dána hodnotami $(\gamma \cdot p \cdot \cos \theta)$. Čím větší je obvod vzorku p , tím větší je plocha určená ke smáčení a tím větší je smáčecí síla. Obvod vzorku a povrchové napětí jsou během testu rovněž konstantní. Jedinou měnící se hodnotou ve výše uvedené rovnici během testu je kontaktní úhel θ . Maximální smáčecí síla nastane pokud se bude kontaktní úhel θ blížit k nule. Toto nám umožňuje porovnávat výsledky reálných vzorků s teoretickou hodnotou.

1.7.2 Metoda SSBA a SBSA

Pro posuzování pájecích vlastností různých povrchů se provádí hodnocení smáčivosti povrchu roztavenou pájkou. Přitom jsou důležité především následující dva faktory:

- stupeň smáčivosti (udává jak daleko se pájka po povrchu rozprostře)
- rychlost smáčení (je to rychlost roztavení a rozprostření pájky závisující na účinnosti zdroje tepla, typu pájky a tavidla, smáčeném povrchu a probíhajících chemických reakcích).

Jednoduchou ale účelnou metodou je zjišťování smáčivosti metodou SSBA (*Sessile Solder Ball Alignment*). Jedná se o test smáčivosti pájeného povrchu s pomocí pájecí kuličky pájky. Kulička je umístěna na pájecí plochu neomezených rozměrů (v praxi dostatečně velkých rozměrů) a přetavena. Po přetavení se hodnotí velikost statického smáčecího úhlu a jakost přetavené pájky: průměr spoje, čistota spoje, zbytky tavidla atd. a výsledky se porovnávají. [8]

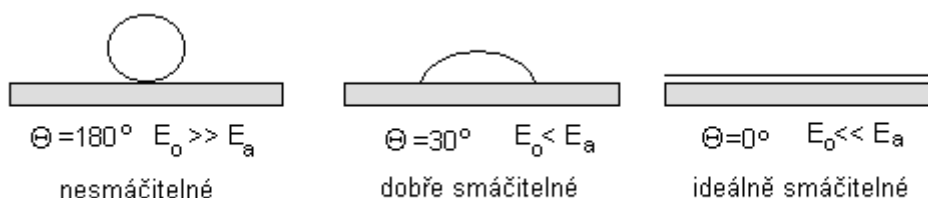


Obr. 1.5 Hodnocení pájitelnosti úhlem smáčivosti podle tvaru pájky

a) dobré b) nevyhovující

Metoda SBSA (*Sessile Ball Shape Analyzing*) se od předchozí metody značně liší. Nevyhodnocuje se v ní jen statický smáčecí úhel, ale celý průběh smáčecího úhlu v průběhu přetavení. Metoda se tedy zabývá dynamikou smáčení a jevy souvisejícími. Hodnotí se změna velikosti smáčecího úhlu v závislosti na čase a na teplotě, dále pak rychlost smáčení reprezentovaná gradientem smáčecího úhlu.

Jestliže kulička tekuté pájky přijde do styku s povrchem jiného kovu, začnou na ni působit dva druhy sil. Kohesivní síly, které se ji snaží udržet v původním stavu, tj. s co nejmenším povrchem při daném objemu a adhesivní síly s tendencí rozšířit kontakt obou kovů na co největší plochu. Velikost této plochy styku je potom mírou pájitelnosti tohoto kovu, jak již bylo uvedeno.



Obr. 1.6 Schématické rozdělení typů pájitelných povrchů

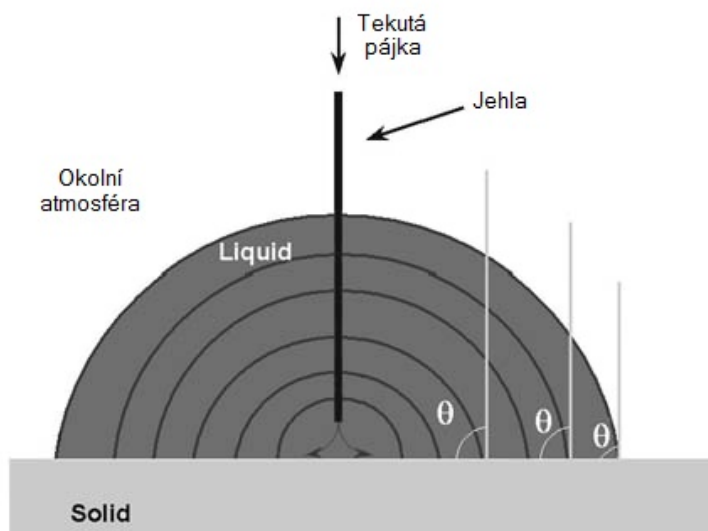
E_0 = povrchová energie, E_a = adhesivní energie, θ = kontaktní úhel

1.7.3 Metoda postupujícího kontaktního úhlu

Tato metoda se používá pro vyhodnocování dynamiky kontaktního úhlu. Kontaktní úhel je určujícím parametrem smáčivosti povrchu a sledování jeho dynamiky lze získat užitečná data pro výzkum dynamiky smáčecího úhlu tekuté pájky. Dynamika kontaktního úhlu je v tomto procesu sledována při zvětšování objemu kapky pájky na kovovém povrchu.

Měření probíhá tak, že na kovový povrch měřeného materiálu se pomocí speciální trubičky podobné injekční jehle o průměru 0,5 mm nanese kapička roztavené pájky. Trubička je zhotovena ze speciálního materiálu, aby nedocházelo ke kontaminaci roztavené pájky. Materiálové složení trubičky se mi z dostupných zdrojů nepodařilo zjistit. Touto jehlou je do roztavené kapky pájky průběžně pumpována další roztavená pájka zvoleným rovnoměrným průtokem z rozsahu 5 ml/min až 15 ml/min. Tím dochází ke zvětšování objemu kapky pájky a postupnému posunu kontaktního rozhraní tekuté pájky-kovu-atmosféry (liquid-solid-gas).

Tento proces je znázorněn na Obr. 1.7. Toto rozhraní však není zezáčátku formováno plynule a je třeba určitého času k dosažení rovnováhy.



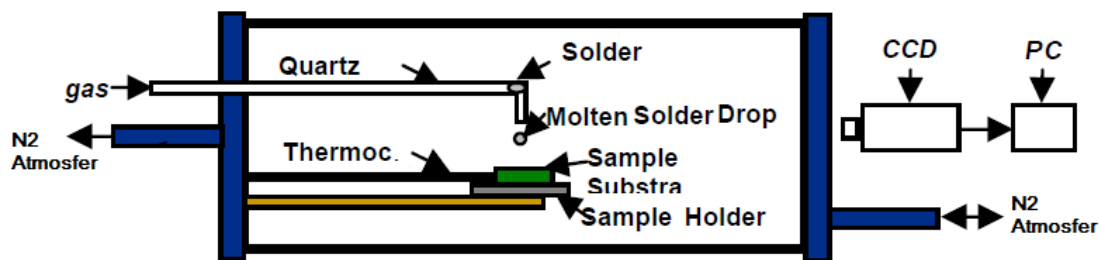
Obr. 1.7 Schématické znázornění metody postupujícího kontaktního úhlu [9]

Rovnováha nastává, když se velikost kontaktního úhlu θ při dalším zvětšování objemu nemění. V této fázi je velikost odečteného kontaktního úhlu rovna smáčecímu úhlu roztavené pájky pro daný povrch. Kontaktní úhel je poté odečítán pomocí záběrů z videokamery.

Výhodou této měřicí metody je absence tavidla, které vnáší do ostatních měření určitou chybu. Nevýhodou je pak požadavek na větší plochu vzorku, než je potřeba například u metody SBSA.

1.7.4 Metoda nastřelování tekuté pájky

Jedná se o zatím méně rozšířenou metodu. Metoda slouží pro studium dynamiky roztékání pájky a s tím souvisejícího smáčecího úhlu zkoumaného kovového povrchu. Experimenty se provádí „nastřelením“ roztavené kapky pájky na povrch vzorku. Roztavená kapka je získávána z křemenné kapiláry, která je naplněna kuličkou pájky, ta je roztavena a vytvoří tak kapku tekuté pájky. Tato kapka je pak kapilárou hnána vpouštěním inertního plynu do jednoho konce kapiláry. Na druhém konci kapiláry je kapka „vystřelena“ na vzorek kovového povrchu. Vzorek je vyhříván skrze své uchycení na teplotu přetavení použité pájky, aby došlo k co nejlepšímu přetavení. Při kontaktu roztavené kapky pájky s povrchem dochází ke smočení, které je sledováno videokamerou a následně vyhodnocováno na počítači. Měřicí sestava je znázorněna na Obr. 1.7.



Obr. 1.7 Schématické znázornění metody nastřelování tekuté pájky [10]

Vysvětlení pojmů:

Gas – Plyn	Sample Holder – Držák vzorku
Solder – Pájka	Quartz – Křemenná kapilára
Sample – Vzorek	N2 Atmosfer – Dusíková atmosféra
Thermoc. – Termočlánek	Molten Solder Drop – Roztavená kapka pájky

Měřena je velikost smáčecího úhlu a rychlost smočení povrchu vzorku. Sledována je především prodleva mezi dopadem kapky pájky na povrch vzorku a smočením, tato prodleva názorně demonstruje rozdíl v povrchových energiích solidu a adhezních energiích pro různé typy povrchů. Z obrázku měřící sestavy je vidět používání ochranné atmosféry, v celé měřící sestavě. Díky tomu je největší výhodou této metody minimální množství oxidačních činidel, k čemuž dopomáhá i absence tavidla, stejně tak jako v předchozí metodě. Jelikož děj smáčení je velice rychlý proces, nevýhodou u této metody může být nutnost použití vysokorychlostní videokamery pro pořizování snímků rychlostí minimálně 200 snímků/s.

2 Experimentální část

Měřicí metoda vychází z metody SBSA, je však použita jiná metoda vyhodnocování. Vyhodnocuje se velikost smáčecího úhlu a rychlost roztékání pájky po povrchu v závislosti na výšce roztečené pájky.

Předchozí laboratorní pozorování a měření smáčivosti povrchu pájecí plochy DPS roztavenou pájkou se prováděla na specializovaném pracovišti. Pracoviště bylo vybaveno stojanem pro úchyt pozorovaného vzorku DPS. Vedle tohoto stojanu byla umístěna průmyslová CCD videokamera PANASONIC typ GP KR 202 s přídavným zvětšením, snímající rychlostí 29,97 snímků za sekundu. Videozáznam byl ve formátu NTSC s rozlišovací schopností 640 pixelů na 480 pixelů.

Tuto měřicí sestavu jsem modifikoval a lépe přizpůsobil pro použitou měřicí metodu. Videokameru jsem nahradil novou videokamerou s lepšími parametry. A následně jsem do sestavy zakomponoval druhou kameru, které bude možno využít pro sofistikovanější měření. Z celé měřicí sestavy jsem vytvořil kompaktní celek, snadnější pro manipulaci. Do vyhodnocovacího procesu jsem implementoval komerčně dostupnější freeware verze programů výhodnější pro ekonomickou stránku metody. Vyhodnocování jsem usnadnil odvozením nových vztahů pro výpočet smáčecího úhlu a vytvořením programu pro automatické odečítání výšky roztečení pájky ze sekvence snímků.

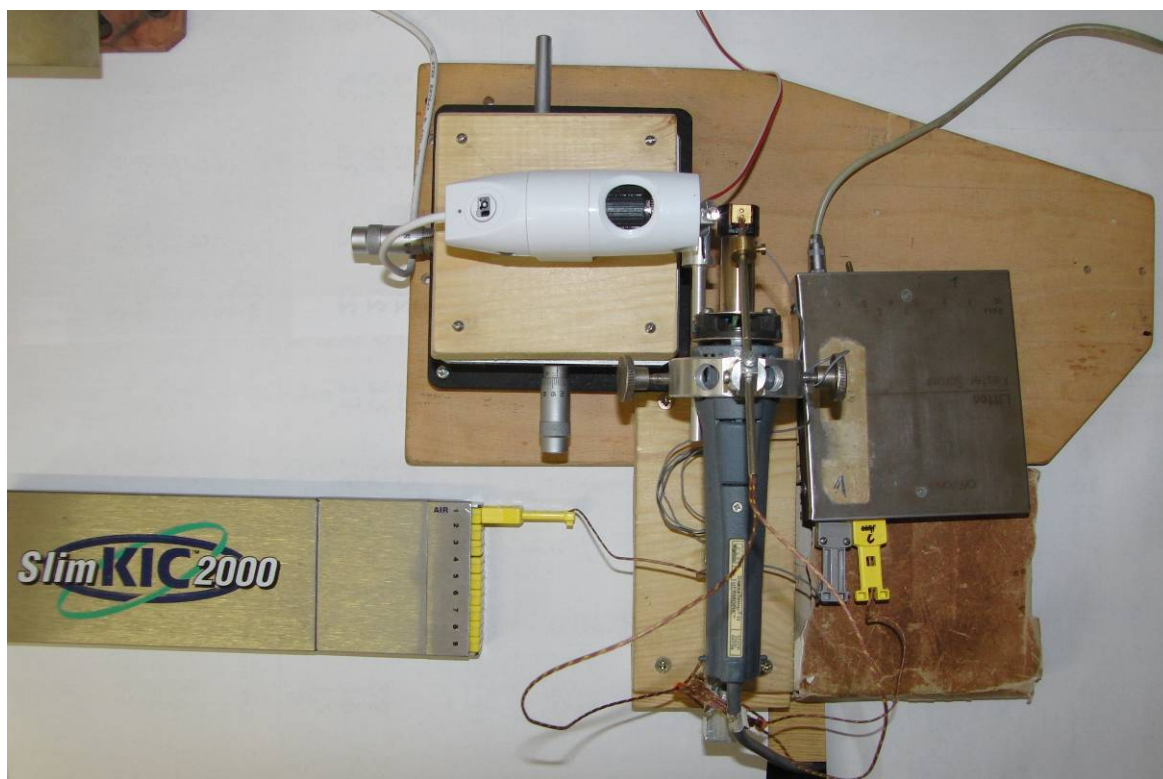
2.1 Měřicí sestava

Měření smáčivosti povrchu pájecí plochy DPS roztavenou pájkou jsem prováděl na nově sestavené měřicí sestavě. V této měřicí sestavě jsem pro pozorování přetavení použil novou videokameru U-Viewer USB Digital Microscope typ MS-01U s velikostí obrazového senzoru 1,3 Mega pixel, jejíž rozlišovací schopnost je 1280 pixelů na 1024 pixelů. Zvětšení je u této kamery volitelné v rozsahu 10x až 230x. Při všech měření bylo nastaveno na nejvyšší hodnotu 230x. Výhodou této videokamery oproti stávající je její vyšší rozlišovací schopnost a možnost přímého propojení s PC pomocí rozhraní USB.

Další výhodou této kamery je její neprokládaný systém záznamu obrazu, oproti předchozí kameře, která snímala obraz prokládaným systémem. Rozdíl v těchto systémech spočívá v metodě snímání obrazu. Prokládaný režim snímá obraz s dvojnásobnou frekvencí snímání pouze ale pulsnímky. V prvním pulsnímku jsou zaznamenány liché řádky a v druhém

přesnějším jsou zaznamenané sudé řádky. Ve výsledku jsou tyto dva přesnější složeny v jeden. Má to však negativní vliv při rozdělení videa na jednotlivé snímky. Při rychlých dějích se od sebe přesnější jednoho plného snímku liší, jelikož každý je pořízen v jinou dobu, to způsobuje nepatrný posun obrazu v jednotlivých řádcích a celkový obraz se tím rozpadá na jednotlivé řádky. Tyto řádky jsou viditelné i v každém snímku vyhodnocované video sekvence a jejich vzájemné posunutí může vést k nepřesnostem při vyhodnocování.

Prokládaný režim je výhodný v tom, že každý snímek pořizuje kompletní stejně jako fotografie, proto nedochází k žádnému rušivému zkreslení. Tento režim je náročnější na hardware, ale v rozlišení používaném při experimentech nejsou tyto nároky nijak přehnané a je pouze vyžadován počítač s procesor Pentium 4 nebo vyšším modelem na minimálním taktu 2 GHz.



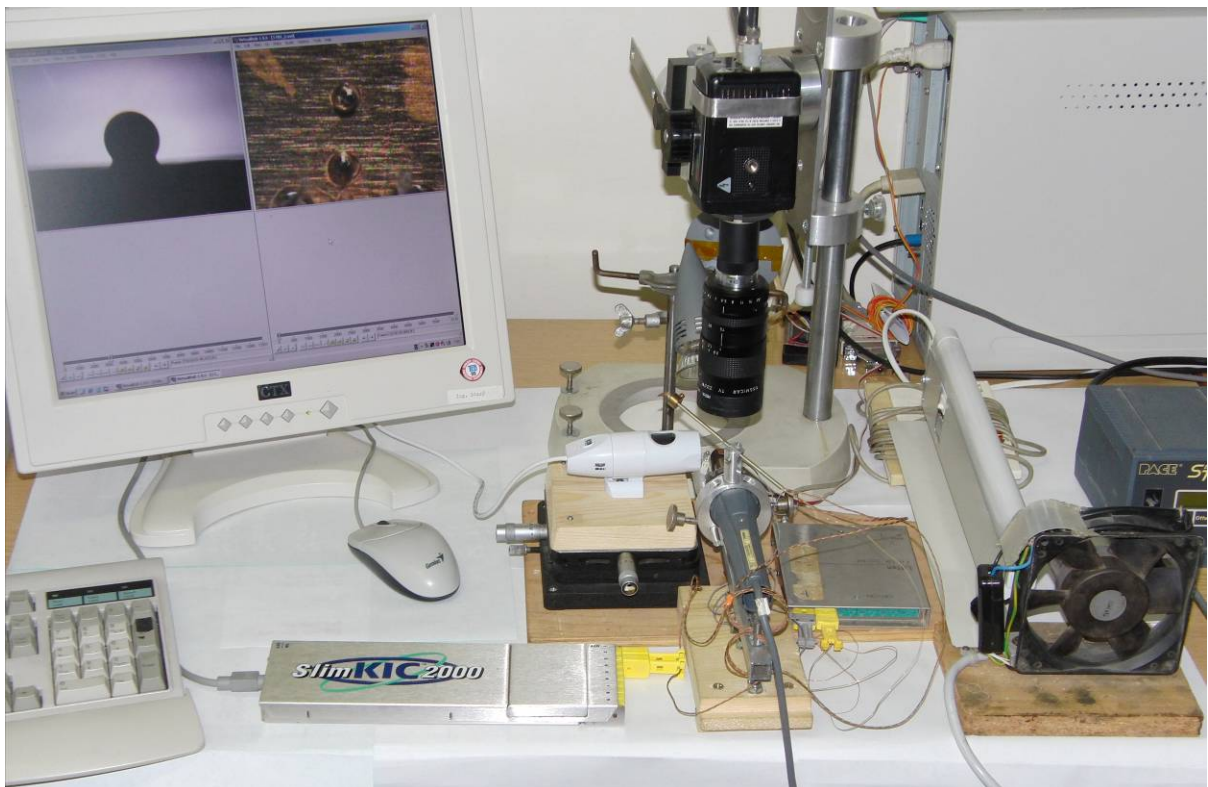
Obr. 2.1 Měřicí sestava osazená videokamerou MS-01U

Pro novou kameru jsem zhotovil nový systém pro uchycení a manipulaci s kamerou, stejně tak i nový podstavec pro uchycení vzorku. Protože zaostření kamery probíhá jejím přibližováním nebo oddalováním od pozorovaného vzorku a ostření při 230-ti násobném zvětšení je velmi citlivé na sebemenší pohyb, umístil jsem podstavec ke kameře na stolek

s milimetrovým posuvem pro pohyb videokamery v ose souřadnic x a y . Úchyt vzorku je realizován nástrojem TP70 a je napojen na termostatickou programovatelnou pájecí stanici PACE ST40. Pro nástroj TP70 jsem sestavil podstavec, pomocí kterého lze pohybovat vzorkem v ose z a také regulovat náklon nástroje se vzorkem k zajištění roviny. Měřicí sestava je ještě doplněna ventilátorem pro zchlazení úchytu DPS mezi jednotlivými měřeními.

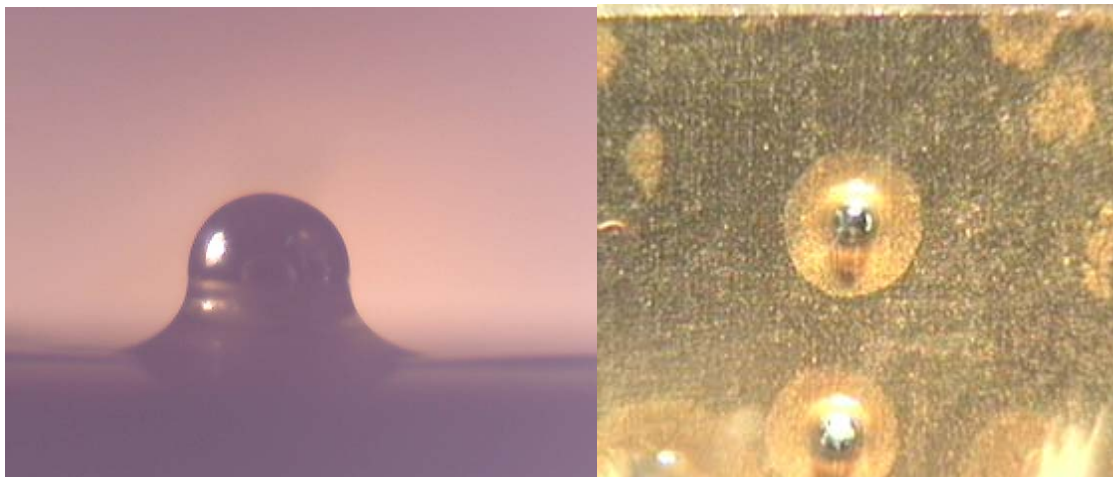
Naproti videokameře, v ose vzorku, je umístěn zdroj světla. Tento zdroj světla je orientován proti objektivu videokamery, čímž nám vzniká jasný a kontrastně odlišný obrys zkoumaného vzorku oproti pozadí. Zdroj světla je potřeba vhodně zvolit tak, aby byl vzorek dostatečně podsvícen, při přílišné intenzitě světelného zdroje však dochází k ozáření videokamery a zahlcení jejího CMOS snímače. Dále je třeba minimalizovat nebo úplně odstranit odlesky od povrchu vzorku nebo kuličky pájky.

Výhodou této měřicí sestavy je upevnění všech částí na společnou základnu, čímž se stává celá sestava snadno přenositelná. Celou tuto sestavu je proto možno snadno umístit do skleněného boxu. Toho se využívá pro měření v ochranné atmosféře, nejčastěji v dusíkové atmosféře. Pro tato měření je možno sestavu kompletně uzavřít a utěsnit.



Obr. 2.2 Měřicí pracoviště osazené oběmi videokamerami

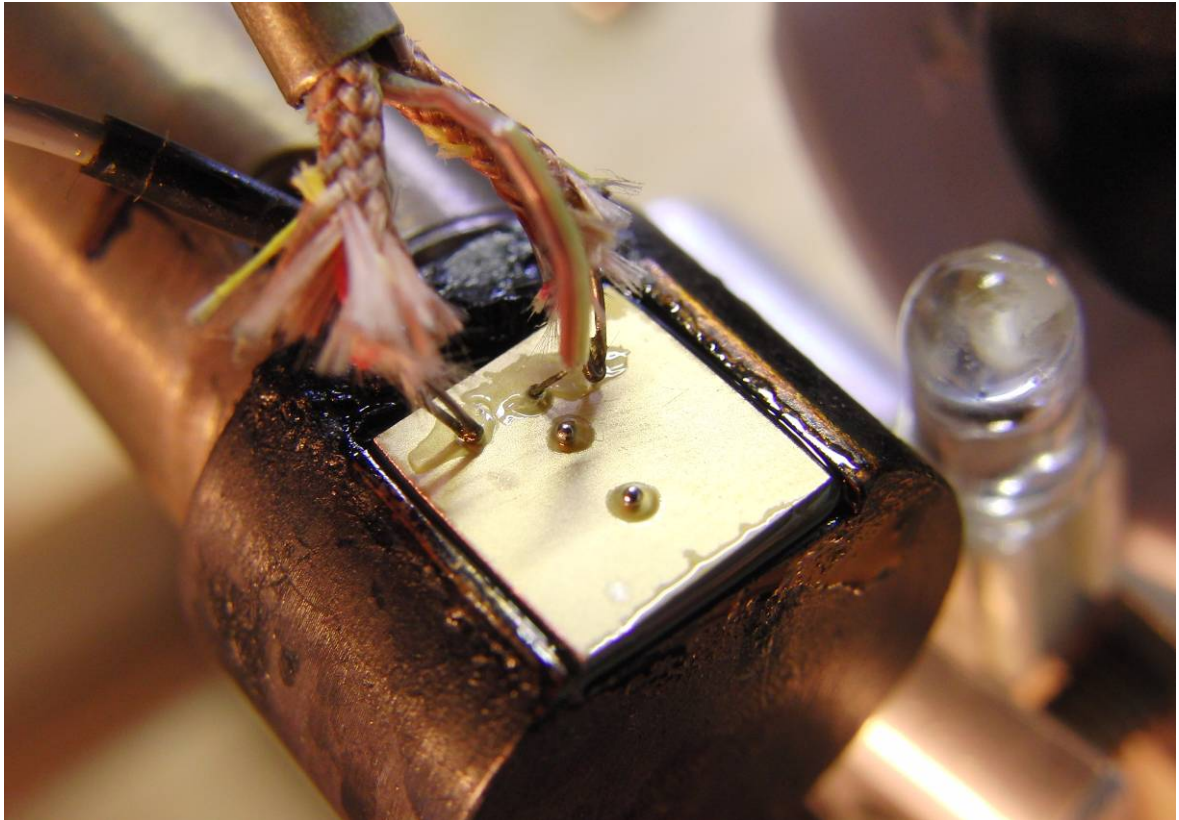
Do měřicí sestavy jsem dále přidal i druhou videokamera PANASONIC typ GP KR 202, zmíněná výše. Tato kamera byla ve stojanu umístěna nad zkoumaný vzorek a jejím účelem bylo snímat zkoumaný vzorek ze shora, viz. Obr. 2.2. Díky tomu je možno natáčet jednotlivé průběhy přetavení ze dvou pohledů, jak je vidět na monitoru počítače na Obr. 2.2. Získáváme tím komplexnější pohled na celý průběh přetavení. Při vyhodnocování, tak je možno získat údaje, které budou moci být použity při tvorbě 3D modelu celého průběhu přetavení.



Obr. 2.3 Různé pohledy na vzorek, pořízené ve stejný čas dvěma kamerami

Pro snímání teploty je využito dvou teplotních profiloměrů. Oba jsou napojeny na počítač, do kterého jsou zaznamenávány snímané teploty. Profiloměry jsou vybaveny termočlánky typu K, jejich pracovní teploty jsou od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. První profiloměr je SOLDERTHERM, k němu jsou připojeny dva termočlánky TC1 a TC2. TC1 je připevněn k podstavci a měří aktuální teplotu ohříváče vzorku. TC2 je vždy umístěn na vrchní části měřeného vzorku a měří aktuální teplotu povrchu měřeného vzorku. Pomocí termočlánků TC1 a TC2, mohu díky tomu sledovat přestup tepla z vyhřívaného přípravku na povrch vzorku. Tento profiloměr je navíc propojen s LED diodou umístěnou před objektivem videokamery, která při spuštění záznamu na profiloměru blikne. Tím je docíleno provázání měření teploty s videozáznamem a díky tomu lze přesně stanovit začátek měření teploty a následně přiřadit k jednotlivým snímkům ze sekvence videozáznamu aktuální změřenou teplotu pro daný snímek. Druhý profiloměr je SLIM KIC 2000, ke kterému jsou opět připojeny dva termočlánky TC3 a TC4. Oba tyto termočlánky jsou, stejně jako termočlánek TC2, umístěny na povrchu vzorku. Všechny tyto tři termočlánky TC2, TC3 a TC4 jsou umístěny v těsné blízkosti referenční kuličky pájky. Je to z důvodu zjistit co nejpřesněji teplotu ohřevu kuličky pájky. Dostatečný přístup tepla k těmto termočláncům zajišťuje nanesení

dostatečného množství tavidla na povrch měřeného vzorku, do kterého jsou poté tyto termočlánky usazeny. Termočlánky TC2, TC3 a TC4 jsou také využity ke stanovení rozložení teplotního gradientu na povrchu měřeného vzorku.



Obr. 2.4 Vzorek usazený v drážce ohřevu, umístění termočlánků TC2, TC3, TC4

2.2 Metodika měření

2.2.1 Vzorky

Jako základní materiál pro vzorky používám destičky z oboustranně mědi plátovaného organického substrátu FR4 běžně používaný pro výrobu DPS.

Základní materiál s označením FR4 je velmi často používaný základní materiál v elektrotechnické výrobě. Výztuž je tvořena skelnou tkaninou a pojivem je epoxidová pryskyřice. Tento základní materiál je z obou stran nalaminován mědí. Tloušťka vzorku je 1,0 mm. Z tohoto materiálu jsou přířezem a drážkováním zhotoveny vzorky o rozměrech 8 mm x

8 mm. U každého vzorku je před měřením třeba odstranit hrany s otřepy vzniklými drážkováním. K tomu používám brusného papíru o hrubosti P600.

Rozdělení vzorků:

A) podle povrchové úpravy:

- NiAu
- OSP
- Cu bez povrchové úpravy

B) podle stáří vzorků

- 5 let přirozeně stárnuté
- nestárnuté, měřené do 5 dnů od výroby

C) podle typu základního materiálu

- FR4
- Si

Vzorky jsem označil šaržemi podle doby výroby. Vzorky šarže 0412 byli vyrobeny ve firmě PCB Benešov, tyto vzorky prošli přirozeným stárnutím 5 let. Vzorky šarže 1005 byli vyrobeny firmou GATEMA Boskovice, tyto vzorky jsem podrobil měření do 5 dnů od jejich výroby.



Obr. 2.5 Kulička pájka na povrchu substrátu křemíku

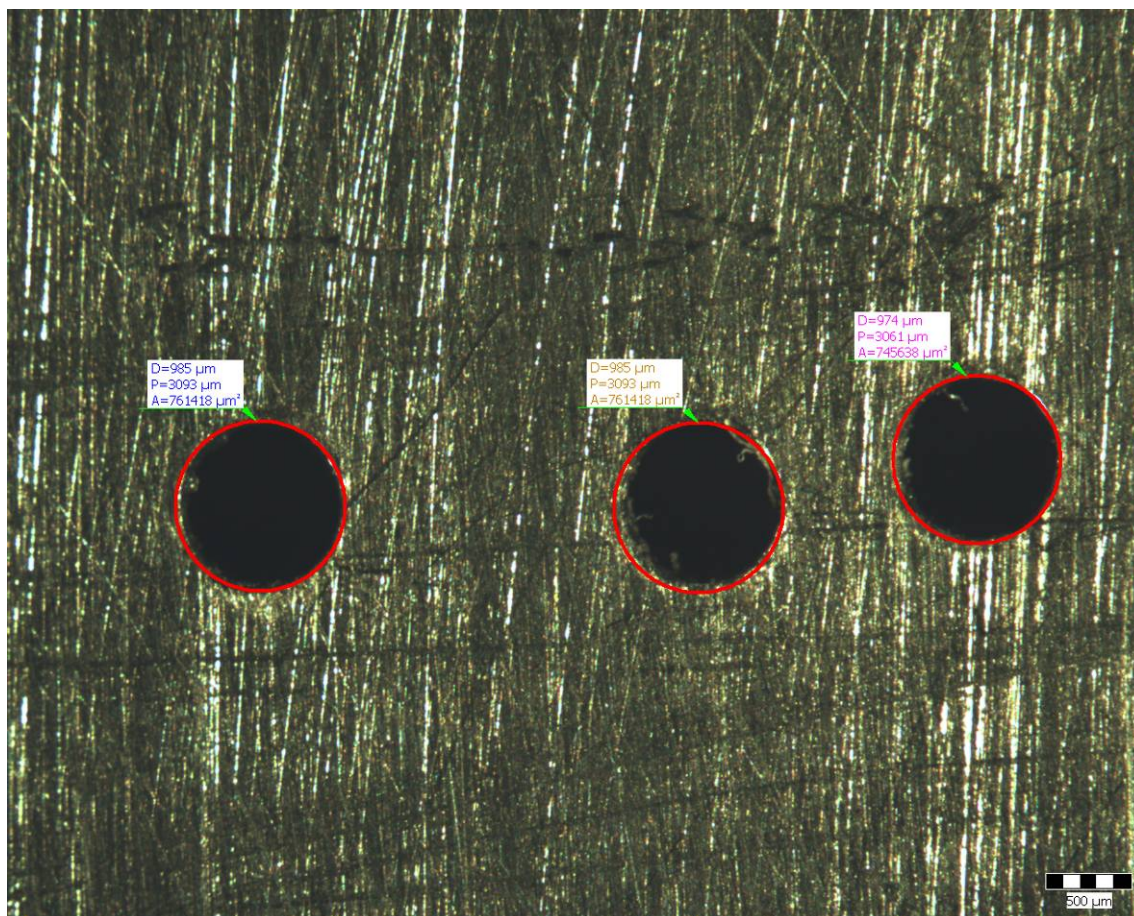
Druhým použitým základním materiálem byl křemík. Pro měřené vzorky jsem využil úlomků ze solárního článku. Kuličky pájky jsem pak nanášel na tu část solárního článku, která byla opatřena kovovou kontaktní ploškou tvořenou klasickou AlAg pastou pro kontaktování solárních článků. Při měření těchto vzorků, jsem musel mezi vzorek a vyhřívaný přípravek vložit tenký plátek mědi o tloušťce 1 mm. Toto opatření jsem musel aplikovat z toho důvodu, protože ve vyhřívacím přípravku je vytvořena drážka, která zabraňuje pohybu vzorku v průběhu přetavení. Výška této drážky je však přizpůsobena pro výšku vzorků ze základního materiálu FR4, jehož tloušťka je 1 mm, zatímco tloušťka vzorku křemíku je pouze 0,3 mm. Díky tomu nebyl vzorek křemíku z pohledu boční kamery přes okraj drážky vidět. Mezi plátek mědi a vyhřívaný přípravek jsem pro lepší přestup tepla nanесl kapku oleje, to samé jsem aplikoval i mezi plátkem mědi a měřeným vzorkem.

2.2.2 Tavidlo a pájka

Tavidlo

Tavidlo používané při měření je pastovité typ TSF 6592 (ROL0). Je to bezoplachové tavidlo určené pro bezolovnaté pájky. Na vzorek je aplikováno šablonovým tiskem přes kovovou šablonu, která je z materiálu mosaz-nikl. Tloušťka šablony je 0,20 mm. V šabloně jsou dvě apertury o průměru 0,50 mm vzdálené od sebe 3 mm, třetí apertura je používána k nanesení tavidla pod termočlánek.

Parametry tisku jsou dány rychlostí pohybu stěrky, která je přibližně 50 mm/s a sklonem stěrky 30° - 40°. Při tisku jsem se snažil dodržovat konstantní parametry tisku.



Obr. 2.6 Měření průměru apertur šablony pro nanášení tavidla

Z daných rozměrů šablony lze vypočítat objem naneseného tavidla. Teoretický objem naneseného tavidla:

$$V_{teor} = \pi r^2 \cdot d \quad (13)$$

r - poloměr apertury

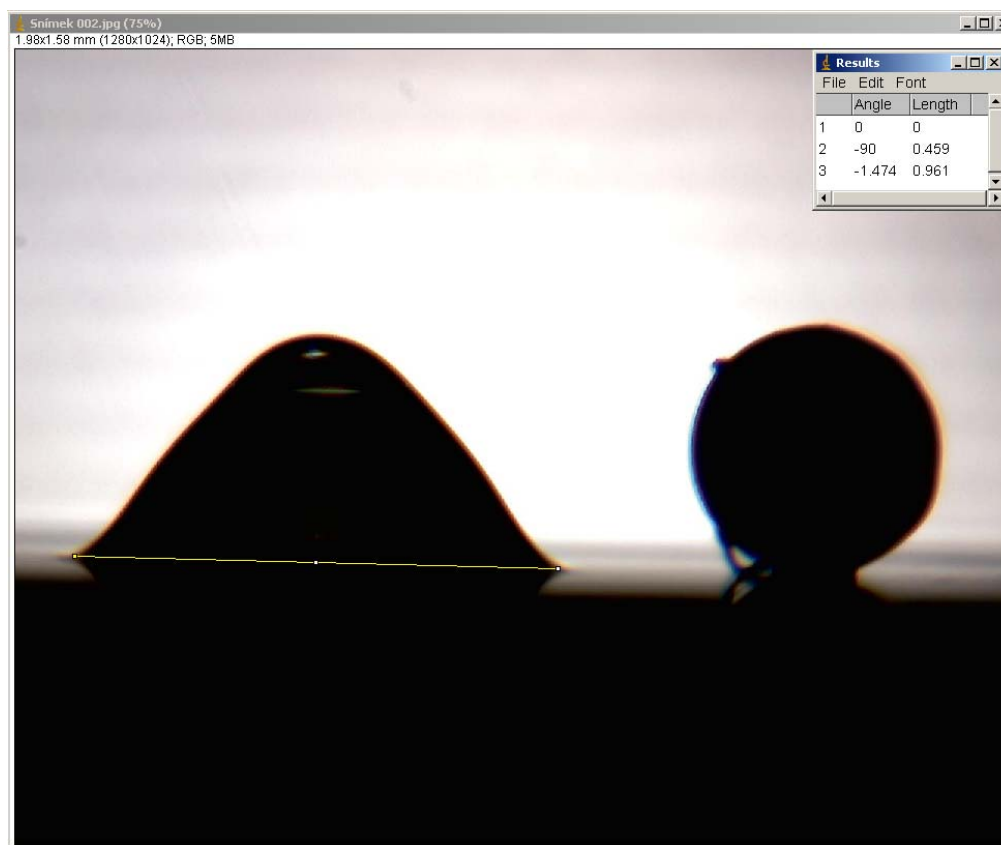
d - tloušťka šablony

Po dosazení dostáváme:

$$V_{teor} = 0,157 mm^3$$

Reálně je však objem natištěného tavidla menší. Dochází k ulpění nepatrného množství tavidla v aperturách šablony. Proto jsem provedl měření již natisknutého tavidla k určení reálného objemu naneseného tavidla.

Při měření jsem využil stejné metody jako při měření kuličky pájky, to je bočního pohledu na vzorek a zadního podsvětlení k určení obrysu naneseného tavidla. Nanesené tavidlo nemá tvar válce, jak by tomu bylo v ideálním případě po nanesení přes šablonu, ale nejvíce se přibližuje tvaru rotačního kužele. Pro zjednodušení výpočtu uvažuji symetrické rozložení natisknutého tavidla.



Obr. 2.7 Měření naneseného tavidla ze snímku pořízeného videokamerou

Měření provádím z fotografie pořízené stejnou kamerou kterou používám k natáčení sekvencí. Z fotografie odečítám výšku naneseného tavidla a poloměr základny kužele tvořeného tavidlem. Jako referenční měřítko je na vzorek vedle naneseného tavidla umístěna kulička pájky o průměru 0,50 mm.

$$V_{real} = \frac{1}{3} \pi r^2 \cdot h \quad (14)$$

r - poloměr základny kužele naneseného tavidla

h - výška naneseného tavidla

Provedl jsem pět různých měření pro pět natištění tavidla, naměřené hodnoty jsou zpracovány v tabulce 2.1.

Tab. 2.1 Měření reálného objemu tavidla

číslo měření	h [mm]	d [mm]	V _{real} [mm ³]
1	0,46	0,96	0,111
2	0,48	0,93	0,109
3	0,53	0,90	0,112
4	0,56	0,87	0,111
5	0,55	0,87	0,109

Výsledná hodnota je aritmetickým průměrem těchto pěti měření. Reálný objem naneseného tavidla je $V_{\text{real}} = 0,11 \text{ mm}^3$.

Pájka

Slitina pájky používaná při všech měřeních je typ 7097 (SAC 405). Jde o bezolovnatou pájecí slitinu se zastoupením prvků Sn = 95,5 %, Ag = 4,0 %, Cu = 0,50 %. Velikost kuliček pájky je certifikována výrobcem na průměr $\varnothing = 0,500 \text{ mm}$ s atestem kvality (92% velikost (0,500 – 0,504) mm, 6% velikost (0,495 – 0,499) mm, 2% velikost (0,505 – 0,509) mm).

Objem kuličky pájky o průměru 0,500 mm je $V_{\text{kul}} = 0,065 \text{ mm}^3$. To znamená, že objemový poměr tavidla a pájky je 2 : 1. Původním záměrem bylo provádět měření při objemovém poměru 1 : 1, což by simulovalo proces pájení přetavením pastovité pájky, kde je v pájecí pastě rovněž objemový poměr složek tavidla a pájky 1 : 1.

2.2.3 Postup měření

K ohřevu využívám kondukční přenos tepla. K ohřevu musí docházet rovnoměrně u obou kuliček pájky stejně, aby hodnoty naměřené na referenční kuličce pájky odpovídali hodnotám na sledované kuličce pájky. Na plošku úchyty vzorku proto nanáším kapičku oleje pro zlepšení přenosu tepla mezi vyhřívaným přípravkem a vzorkem.

Postup jednotlivých experimentů je následující. Povrch vzorku ZM chemicky očistím od mastnoty a nečistot izopropylalkoholem. Na takto připravenou destičku vzorku s požadovanou povrchovou úpravou nanesu definované množství tavidla. Nanášení provádím metodou šablonového tisku. Tavidlo zde plní, mimo jiné, i funkci fixační. Na nanesené tavidlo umístím kuličky pájky definované velikosti. Na pájecí plošku pájky přidám kapku oleje pro lepší přestup tepla mezi pájecí ploškou a vzorkem. Vzorek i s nanesenými kuličkami uložím na pájecí plošku vyhřívaného přípravku s regulací teploty. Do těsné blízkosti jedné z

kuliček pájky se připevní teplotní čidla termočlánků TC2, TC3 a TC4, jak je vidět na obr. 2.4, tuto kuličku pájky poté považují za referenční a slouží pro stanovení teploty na druhé kuličce pájky. Dostatečného přitlaku upevnění čidel je docíleno zatížením ramena s čidly. Pro lepší přestup tepla k termočlánkům, jsou termočlánky umístěny stejně jako kuličky pájky do tavidla.

Na počítači je potřeba si připravit programy pro záznam teplot z profiloměrů a také program pro záznam videosekvencí. Programy pro zaznamenávání teplot z profiloměrů jsou specializované programy k tomuto určené a dodávají se společně s profiloměrem. Pro záznam videosekvencí je použit freeware program VirtualDUB verze 1.9.5. V tomto programu je potřeba v nabídce *File* vybrat položku *Capture AVI...*, tím se spustí okno pro nahrávání videozáznamů z externího zdroje. V tomto okně zvolíme v položce *Device* externí zdroj, z kterého chceme nahrávat pořizovaný videozáznam. Dále zvolíme v menu *File* položku *Set Capture File...*, kde si zvolím název uloženého videosouboru a místo uložení videosouboru na pevném disku. Záznam videa poté spustím v menu *Capture* položkou *Capture Video*. Video je ukládáno ve formátu *.AVI*.

Pozorovaný vzorek ZM s kuličkami ohřívám dokud nedojde k přetavení kuliček pájky. Na programovatelné pájecí stanici PACE ST40 je nastavena teplota 280 °C. Při spuštění ohřevu spouštím zaznamenávání teplot na profiloměru KIC, tj. termočlánků TC3 a TC4, zároveň spouštím i záznam videa. Druhý profiloměr spouštím až při teplotě ohřevu vzorku 100 °C, spuštění tohoto profiloměru je na videu signalizováno bliknutím LED diody umístěné v prostoru mezi vzorkem a objektivem videokamery, tím je docíleno provázání měření teploty s časovým průběhem.

2.3 Zpracování dat

Metoda zpracování dat spočívá ve vyhodnocování jednotlivých snímků, z kterých je následně určena velikost smáčecího úhlu a graficky zpracován průběh velikosti smáčecího úhlu v časové ose.

Odečítané parametry pro vyhodnocování:

- výška kulového vrchlíku
- teplota
- čas

Vyhodnocování videosekvencí uložených z kamery předchází několik úprav. Z jednotlivých videosekvencí jsou nejprve vystřiženy úseky videozáznamu týkající se přímo procesu přetavení kuličky. Tyto záběry jsou převedeny na jednotlivé snímky a jako obrázky

typu 24bitový rastr (černobílý obraz) uloženy (viz. Příloha 1 a 2). Tento proces probíhá stále ve freeware programu VirtualDUB verze 1.9.5. Označený výsek videozáznamu uložíme jako sekvenci fotografií přes menu *File* položku *Export*, kde zvolíme *Image Sequence...*

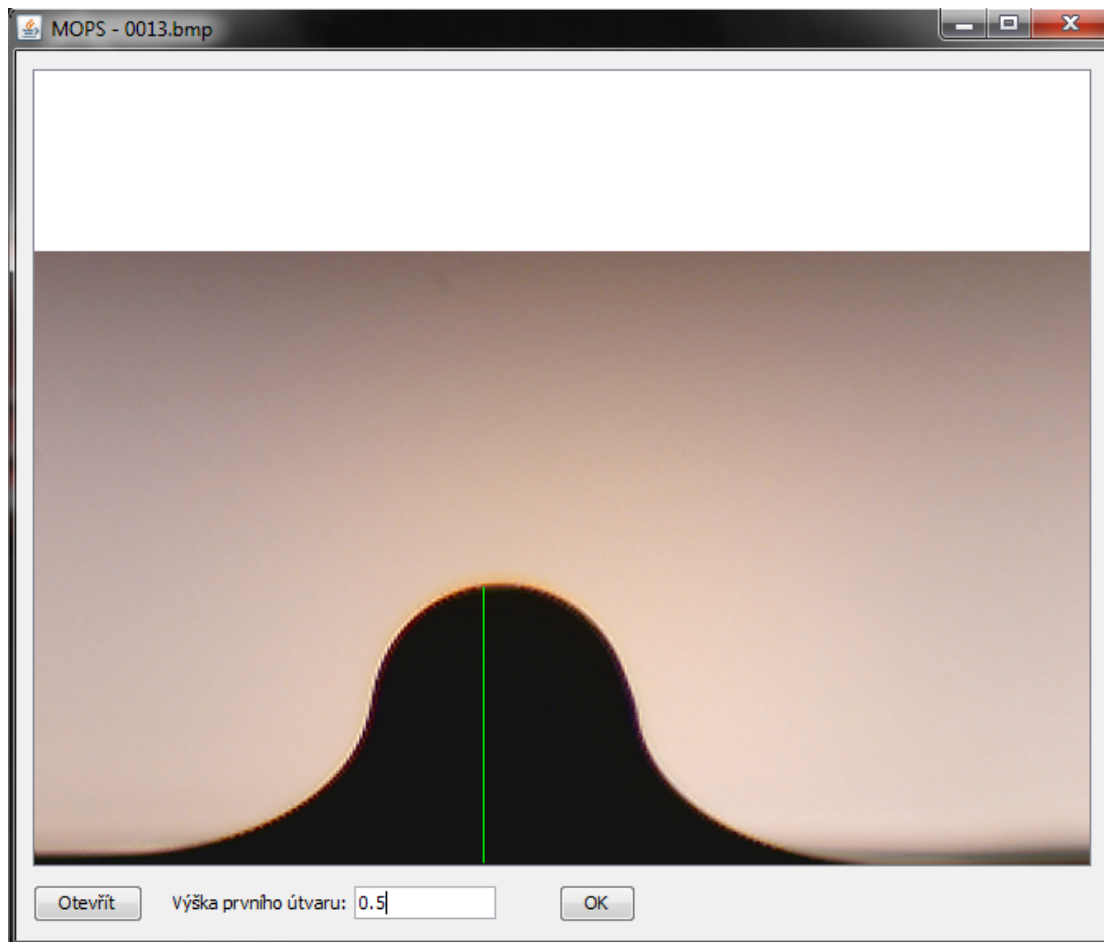
Před vytvořením programu pro automatické vyhodnocování sekvencí fotografií byl další postup následující.

Ze získané sekvence snímků jsem vybral dvacet až čtyřicet snímků pro následné vyhodnocování. Vybrané snímky jsem vyhodnocoval ve freeware programu ImageJ verze 1.42. V tomto programu jsem odečítal z jednotlivých fotografií výšku kulového vrchlíku tvořeného roztékající se kuličkou pájky. Jednotlivé snímky se v tomto programu otevírají přes nabídku *File* položku *Open...*. K odečtení výšky slouží funkce *Straight line selection* z nabídkové lišty nástrojů. Po označení měřené vzdálenosti odečteme naměřenou hodnotu pomocí klávesové zkratky *Ctrl+M*, nebo příkazem *Measure* v nabídce *Analyze*. Tím dojde i k uložení naměřené hodnoty do souboru, který lze uložit buď jako textový dokument ve formátu *.txt* a nebo jako list aplikace *Excel* ve formátu *.xls*. Tento proces opakujeme pro všechny snímky v sekvenci. Jelikož program ve výchozím nastavení měří v pocalech je potřeba v prvním snímku nastavit měřítko, to se provede v nabídce *Analyze* přes položku *Set Scale...*. Po vyhodnocení všech snímků jsem soubor s naměřenými hodnotami importoval do aplikace *Excel* do šablony tabulky pro výpočet smáčecího úhlu.

V závěru práce jsem vytvořil program pro automatické odečítání výšky roztečení pájky (kulového vrchlíku) ze sekvence fotografií. Program nese název MOPS, jde o zkratku slov *Measuring Of Picture Sequences*. Při použití tohoto programu je postup vyhodnocování následující.

Před vytvořením sekvence snímků, je potřeba upravit úsek videozáznamu ze kterého budu videosekvence vytvářet. K tomu použiji výše zmíněný freeware program VirtualDUB. Zpracovávaný úsek videozáznamu otevřu přes nabídku *File* položkou *Open video file...*. Následuje oříznutí záběru v místě linie povrchu vzorku. To provedu v nabídce *Video* vyvoláním položky *Filters...*, kde použiji tlačítko *Add...* a ze seznamu vyberu filtr s názvem *null transform*. Výběr potvrdím, čímž se dostanu zpět do nabídky *Filters*. Zde použijeme tlačítko *Cropping...* a vybereme linii povrchu vzorku. Po potvrzení dojde k oříznutí. Takto upravený úsek videa uložím jako sekvenci snímků přes menu *File* položku *Export*, kde zvolíme *Image Sequence...* Při vytváření zadáme počet míst v názvu snímků na 4 a zvolím formát názvu snímku *0001.bmp*. Tlačítkem *Ok* se snímky uloží do vybrané složky.

Takto vytvořenou složku se snímky otevřu ve vytvořeném programu MOPS. Okno tohoto programu je zobrazeno na Obr 2.7, jde o velmi jednoduché rozhraní.



Obr. 2.8 Okno programu pro automatické odečítání výšky z fotografií

Tlačítkem *Otevřít* načtu složku se sekvencí snímků, je možné zvolit celou složku a nebo určitý snímek od kterého bude probíhat měření. Dále pak do pole *Výška prvního útvaru* zadám výšku kuličky na prvním snímku, tím určím měřítko pro všechny snímky v měřené sekvenci. Měření se spustí tlačítkem *OK*. Výsledky měření jsou automaticky uloženy do umístění složky s měřenou sekvencí snímků v souboru formátu *.txt*. Tento soubor pak již lze snadno importovat do tabulky programu *Excel* připravené pro výpočet smáčecího úhlu a vykreslení grafů časové závislosti smáčecího úhlu.

2.3.1 Výpočet smáčecího úhlu

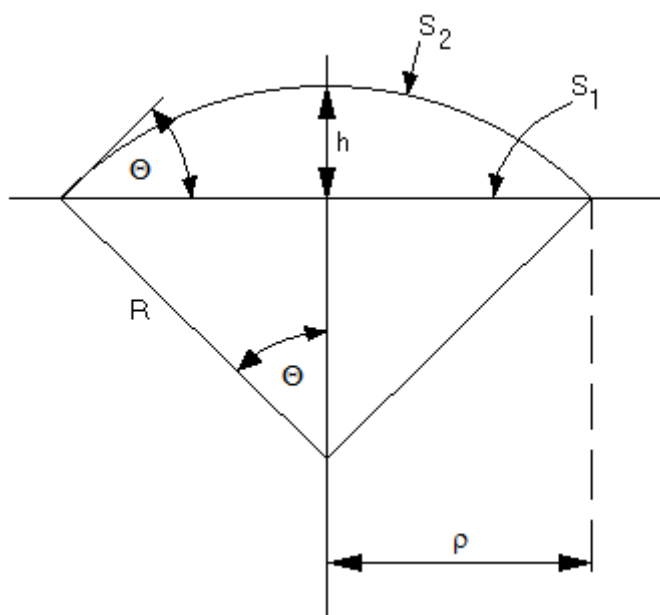
V literatuře používaný vzorec (15) pro vyhodnocování smáčecího úhlu θ :

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{2 \cdot \rho \cdot h}{\rho^2 - h^2} \quad (15)$$

θ smáčecí úhel

ρ poloměr základny kulového vrchlíku

h výška kulového vrchlíku



Obr. 2.9 Geometrie kulového vrchlíku

Výšku kulového vrchlíku odečítám z pořízených snímků pomocí programu ImageJ. Poloměr základny kulového vrchlíku, neboli poloměr styčné plochy na rozhraní pájky a kovového podkladu dopočítávám pomocí vzorce (18). Při výpočtu vycházím z předpokladu, že objem pájky se v průběhu přetavení nemění. Platí, že objem kuličky pájky je roven objemu přetavené pájky, u které uvažuji, že má tvar kulového vrchlíku. Objem kuličky pájky V_0 je dán jejím poloměrem r_0 a vypočítá se jako objem koule:

$$V_0 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_0^3 \quad (16)$$

Objem kulového vrchlíku V_V :

$$V_V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot h \cdot (3 \cdot \rho^2 + h^2) \quad (17)$$

Z tohoto vztahu si vyjádříme poloměr základny kulového vrchlíku ρ :

$$\rho = \sqrt{\frac{2 \cdot V_V}{\pi \cdot h} - \frac{h^2}{3}} \quad (18)$$

Platí že $V_0 = V_V$, tudíž dostáváme pro výpočet poloměru základny kulového vrchlíku ρ vztah:

$$\rho = \sqrt{\frac{2 \cdot V_0}{\pi \cdot h} - \frac{h^2}{3}} \quad (19)$$

Pokud známe výšku kulového vrchlíku a jeho objem, ten je definovaný objemem nepřetavené kuličky pájky, můžeme po dosazení do vzorců (19) a (15) vypočítat smáčecí úhel.

Tento postup má však jedno zásadní omezení. Ve vzorci (15) pro výpočet smáčecího úhlu je použita goniometrická funkce tangens, která však není definovaná pro hodnotu 90° . Tudíž lze tuto metodu použít pouze pro výpočet smáčecích úhlů menších než 90° . Hodí se tedy k výpočtu smáčecího úhlu již přetavené pájky. Pro měření celého průběhu přetavení je však nepoužitelná.

Tuto metodu používám pro výpočtu statického smáčecího úhlu při měření na mikroskopu, kde měřím již přetavenou kuličku pájky. V tomto případě je však měřenou veličinou poloměr roztečení, neboli poloměr základny kulového vrchlíku a pro výpočet výšky roztavené pájky (kulového vrchlíku) používám vzorec (20).

$$h = \left(\frac{3V_0}{\pi} + \sqrt{\left(\frac{3V_0}{\pi} \right)^2 + \rho^6} \right)^{1/3} + \left(\frac{3V_0}{\pi} - \sqrt{\left(\frac{3V_0}{\pi} \right)^2 + \rho^6} \right)^{1/3} \quad (20)$$

Abych mohl sledovat smáčecí úhel v celém průběhu procesu přetavení, odvodil jsem vlastní vztah pro výpočet smáčecího úhlu. Vycházel jsem z následujícího vztahu porovnávajícího obsahy částí kulového vrchlíku [1]:

$$S_2 = S_1 \cdot \frac{2}{1 + \cos \theta} \quad (21)$$

θ smáčecí úhel

S_1 obsah základny kulového vrchlíku

S_2 obsah pláště kulového vrchlíku

Tento vztah (20) jsem zvolil, protože je v něm použita goniometrická funkce cosinus. Tato funkce je definována v celém oboru hodnot, proto jí lze použít pro celý rozsah měřených úhlů od $180^\circ - 0^\circ$.

Obsah základny kulového vrchlíku S_1 se vypočítá jako obsah kruhu:

$$S_1 = \pi \rho^2 \quad (22)$$

Pro obsah pláště kulového vrchlíku S_2 platí:

$$S_2 = \pi \cdot (h^2 + \rho^2) \quad (23)$$

ρ poloměr základny kulového vrchlíku

h výška kulového vrchlíku

Po dosazení vztahu (22) a (23) do rovnice (21) dostáváme:

$$\pi \rho^2 \cdot \frac{2}{1 + \cos \Theta} = \pi \cdot (h^2 + \rho^2) \quad (24)$$

Po úpravě získáme vzorec pro výpočet smáčecího úhlu θ :

$$\cos \Theta = \frac{2 \cdot \rho^2}{\rho^2 + h^2} - 1 \quad (25)$$

Touto metodou již lze měřit smáčecí úhel v celém průběhu procesu přetavení a je tedy výhodnější pro následné studium dějů probíhajících při tomto procesu.

Pro snadnější výpočet jsem do vztahu (25) dosadil za ρ vztah (19) a po následné úpravě jsem získal výsledný vztah pro výpočet smáčecího úhlu:

$$\cos \Theta = \frac{6 \cdot V_0 - \pi \cdot h^3}{3 \cdot V_0 + \pi \cdot h^3} - 1 \quad (26)$$

Pokud tedy známe výšku kulového vrchlíku a jeho objem, který je definovaný objemem nepřetavené kuličky pájky, můžeme po dosazení do vzorce (26) vypočítat smáčecí úhel v libovolném bodě průběhu přetavení. Příklad výpočtu pro jeden průběh měření je uveden v Příloze 3.

Pro stanovení poloměru roztečení v průběhu přetavení používám vzorec (26). Sice se nabízí metoda odečítání poloměru roztečení přímo ze získaných sekvencí snímků, zde však díky přítomnosti tavidla nelze vždy jednoznačně určit rozhraní roztékající se pájky. Proto využívám mnohem přesnějšího odečítání výšky roztékající se pájky a následně poloměr roztečení dopočítávám pomocí vzorce (19).

2.4 Dosažené výsledky

Hodnoty získané z vyhodnocení jednotlivých měření jsem zpracoval do grafů teplotně časových závislostí smáčecího úhlu. Použil jsem dva typy grafů, rozdělených podle rozpětí pozorovaných hodnot. V prvním typu grafů je zobrazen celkový průběh smáčecího úhlu, v druhé skupině grafů je pak zobrazen průběh pouze od hodnoty smáčecího úhlu 90° , pro lepší čitelnost dosaženého výsledného smáčecího úhlu a určení dynamiky smáčení.

Pro vzájemné porovnávání průběhů jednotlivých měření jsem jako referenční bod zvolil hodnotu smáčecího úhlu 90° , která odpovídá inflexnímu bodu teoretického průběhu smáčecího úhlu. V tomto bodě jsem pro osu x zvolil hodnotu času $t_0 = 0$ s. Následující hodnoty časové osy jsou počítány z čísla snímků vzorcem:

$$t = t_0 + \frac{\text{č.snímku}}{30}, \text{ resp. pro snímky předcházející času } t_0: t = t_0 - \frac{\text{č.snímku}}{30}$$

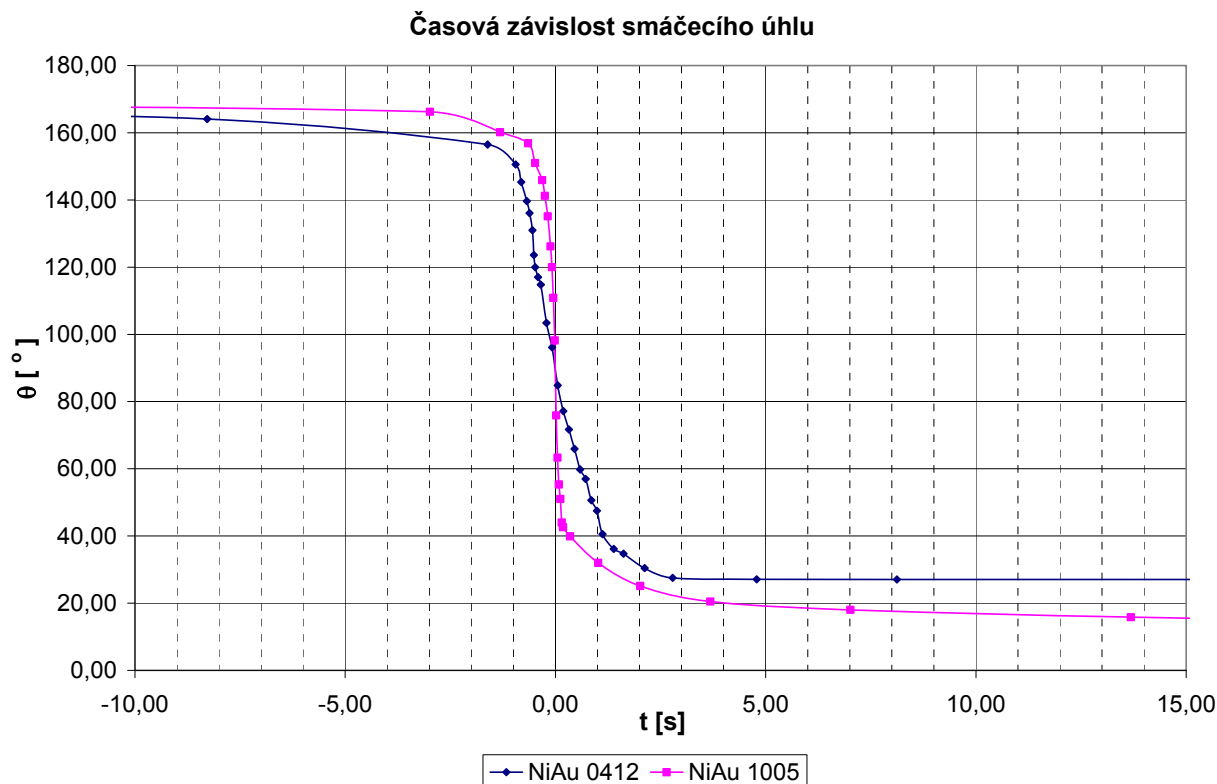
Pro grafy s celkovým průběhem smáčecího úhlu jsem volil rozpětí časové osy od -10 s do $+15$ s, kdy došlo k ustálení hodnoty smáčecího úhlu. V čase $t = 15$ s odečítám hodnotu výsledného smáčecího úhlu.

Pro každý typ vzorků jsem provedl 6 měření, které jsem zprůměroval aritmetickým průměrem. Do grafů jsem pak vynášel takto zprůměrované hodnoty. Výjimku tvořil vzorek se základním materiálem křemíkem, který jsem zpracovával nad rámec zadání a vzhledem k časovému nedostatku jsem nebyl schopen provést dostatečný počet měření.

Další sledovanou veličinou je rychlost smáčení, která je vyjádřena gradientem smáčecího úhlu za jednotku času. Tato hodnota odpovídá směrnici tečny ke křivce průběhu smáčecího úhlu v inflexním bodě, v mém případě při hodnotě 90° .

Rozdíl hodnot výsledného smáčecího úhlu mezi jednotlivými typy vzorků značím Δ_θ .

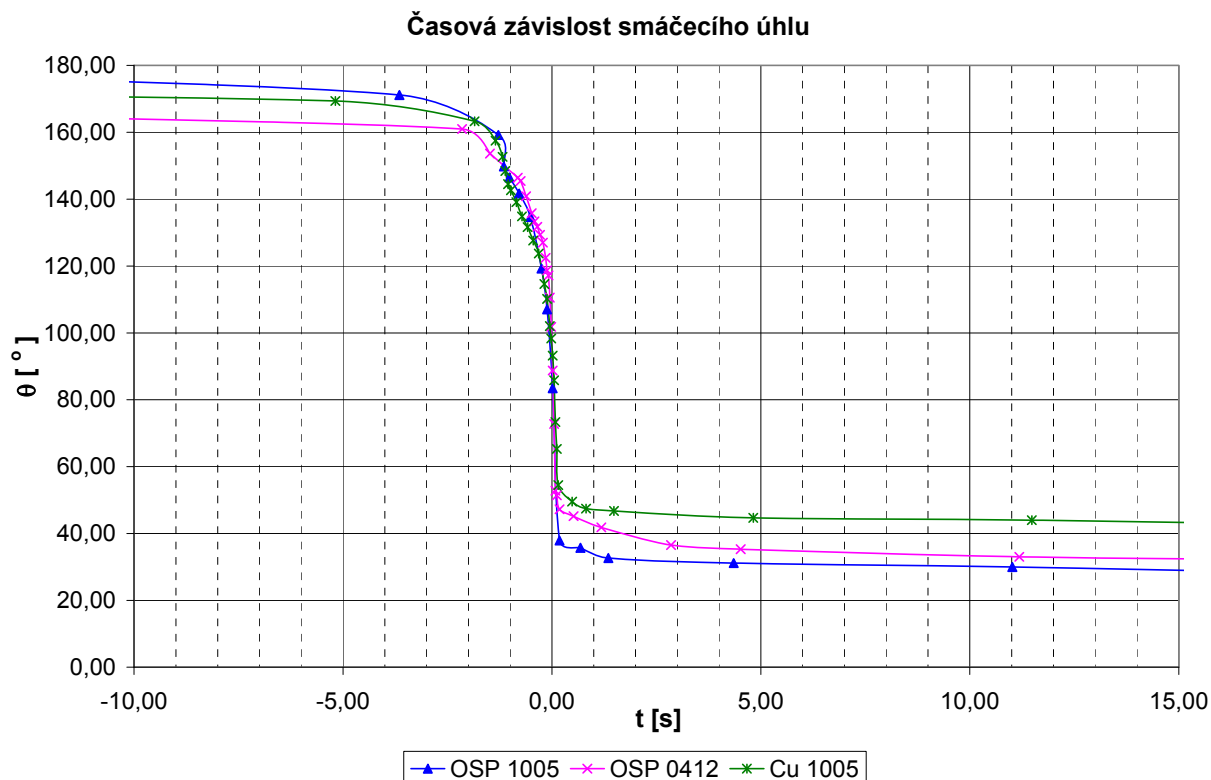
Rychlost smáčení pak značím v_s .



Obr. 2.10 Graf měření pro vzorky s povrchovou úpravou NiAu

V prvním grafu na Obr. 2.10 jsou zobrazeny průběhy naměřené se vzorky s povrchovou úpravou NiAu. Porovnávám zde vzorky přirozeně stárnuté, šarže 0412 a vzorky nové, šarže 1005. Výsledný smáčecí úhel stárnutých vzorků vyšel $\theta = 27^\circ$, zatímco pro nové vzorky vyšel výsledný smáčecí úhel $\theta = 15^\circ$. Rozdíl ve smáčivosti je tedy $\Delta_\theta = 12^\circ$.

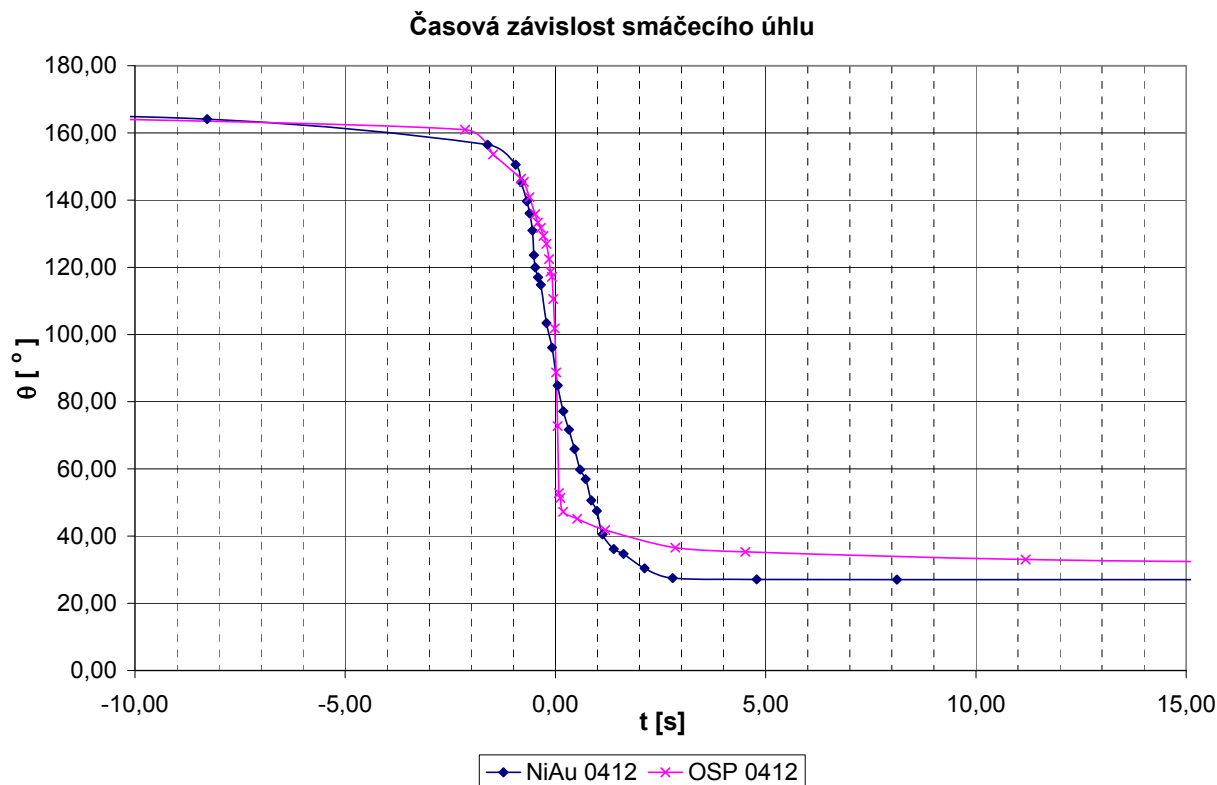
Změřené průběhy se liší i v rychlosti smáčení. U stárnutých vzorků je rychlost smáčení $v_s = 65^\circ/\text{s}$. U nových vzorků probíhá smáčení mnohem rychleji $v_s = 325^\circ/\text{s}$.



Obr. 2.11 Graf měření pro vzorky s povrchovou úpravou OSP a Cu bez PÚ

Druhý graf na Obr. 2.11 zobrazuje průběhy naměřené se vzorky s povrchovou úpravou OSP a bez povrchové úpravy. Pro povrchovou úpravu OSP jsem použil vzorky stárnuté, šarže 0412 a vzorky nové, šarže 1005. Vzorky bez povrchové úpravy jsou použity nové, šarže 1005. Výsledný smáčecí úhel stárnutých vzorků s povrchovou úpravou OSP vyšel $\theta = 32^\circ$, pro nové vzorky s povrchovou úpravou OSP vyšel výsledný smáčecí úhel $\theta = 28^\circ$. Vzorky Cu bez povrchové úpravy dosáhly smáčecího úhlu $\theta = 41^\circ$. Rozdíl ve smáčivosti stárnutých a nestárnutých vzorků je $\Delta\theta = 4^\circ$. Zatímco rozdíl ve smáčivosti vzorků s povrchovou úpravou a bez povrchovou úpravou je $\Delta\theta = 12^\circ \pm 2^\circ$.

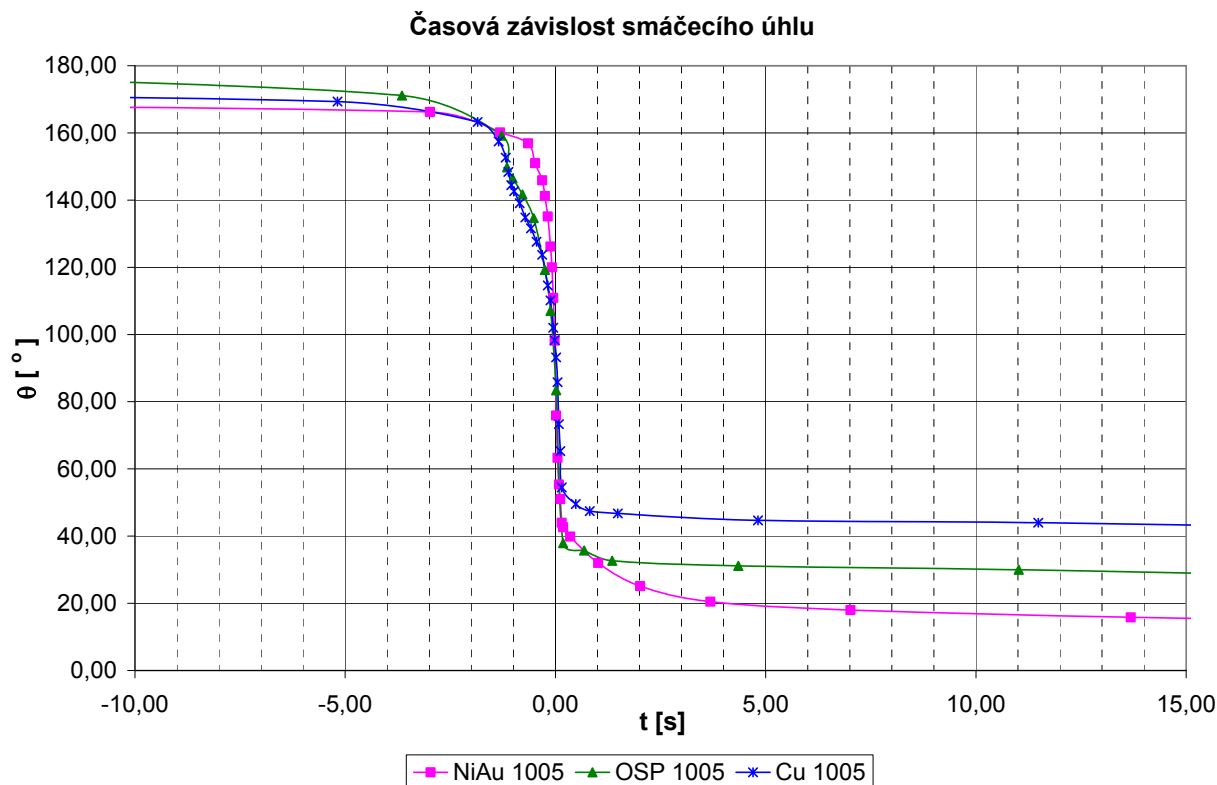
Rychlost smáčení je pro všechny tři typy vzorků přibližně stejná. Její hodnota je největší pro nestárnuté vzorky s povrchovou úpravou OSP $v_s = 205^\circ/\text{s}$, pro stárnuté vzorky s povrchovou úpravou OSP $v_s = 201^\circ/\text{s}$ a pro vzorky Cu bez povrchové úpravy $v_s = 195^\circ/\text{s}$.



Obr. 2.12 Graf měření pro stárnuté vzorky s různou povrchovou úpravou

Do grafu z Obr. 2.12 jsem vynesl závislosti porovnávající úhel smáčivosti pro stejně stárnuté vzorky šarže 0412 s různými povrchovou úpravou. Povrchová úprava NiAu dosáhla lepšího smáčení, velikost jejího výsledného smáčecího úhlu je $\theta = 27^\circ$. Velikost výsledného smáčecího úhlu pro povrchovou úpravou OSP je $\theta = 32^\circ$. Rozdíl výsledného úhlu smáčení je tedy pro tyto dvě povrchové úpravy $\Delta\theta = 5^\circ$.

Rozdíl je i v rychlosti smáčení, velikost tohoto rozdílu je rovna $\Delta v_s = 135^\circ/\text{s}$.



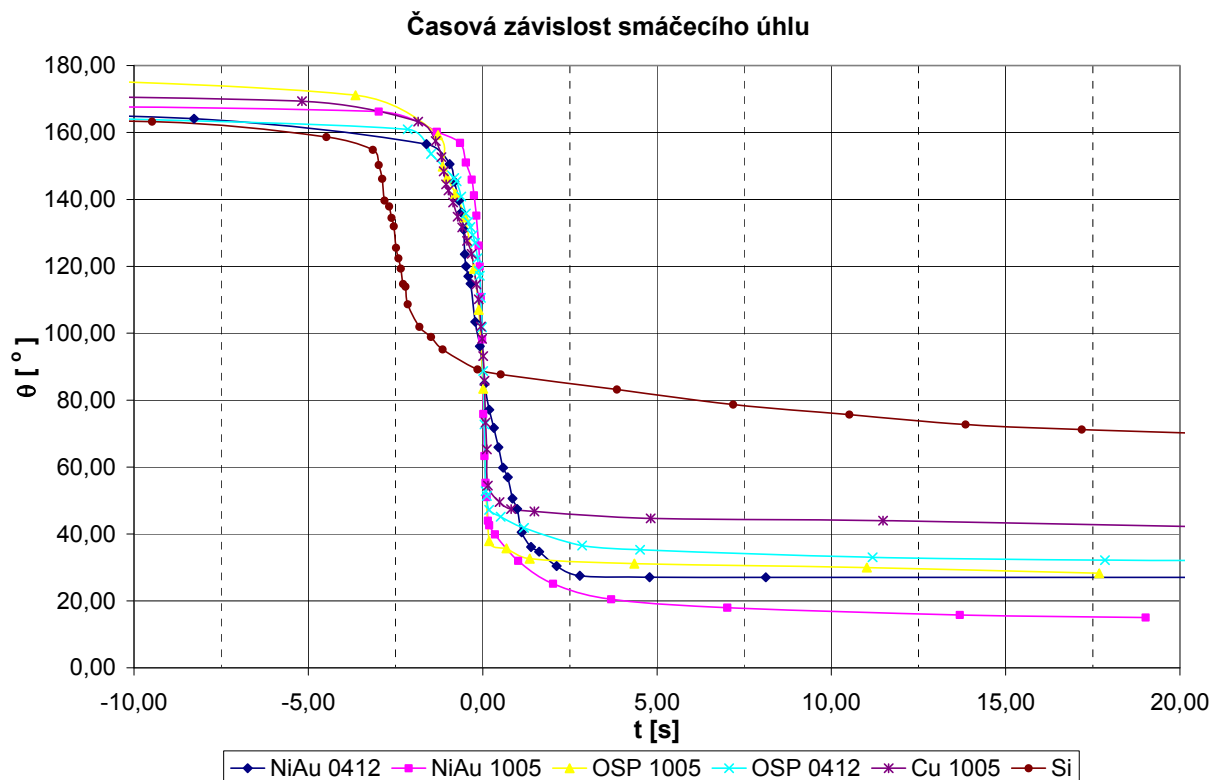
Obr. 2.13 Graf měření pro nestárnuté vzorky s různou PÚ a pro Cu bez PÚ

Graf na Obr. 2.13 znázorňuje rozdílné povrchové úpravy pro nestárnuté vzorky stejné šarže 1005. Porovnává vzorky s povrchovou úpravou NiAu, OSP a Cu bez povrchové úpravy. Smáčecí úhly jsou následující:

$$\theta_{\text{NiAu}} = 15^\circ, \theta_{\text{OSP}} = 28^\circ, \theta_{\text{Cu bez PÚ}} = 41^\circ.$$

Rozdíl mezi povrchovou úpravou NiAu a OSP činí $\Delta_\theta = 13^\circ$, rozdíl mezi povrchovou úpravou OSP a vzorky Cu bez povrchové úpravy je $\Delta_\theta = 13^\circ$, rozdíl mezi povrchovou úpravou NiAu a vzorky Cu bez povrchové úpravy je ale již $\Delta_\theta = 26^\circ$.

Rychlost smáčení se u těchto vzorků výrazně neliší. Je zde pouze vidět rychlejší nástup smáčení u vzorků s povrchovou úpravou oproti vzorkům bez povrchové úpravy.



Obr. 2.14 Graf měření smáčecího úhlu se všemi typy vzorků

V grafu na Obr. 2.14 jsem vynesl společně průběhy všech měřených typů vzorků a přidal jsem ještě pro porovnání průběh měření provedeného na základním materiálu křemíku. Křemík díky svým odlišným fyzikálním vlastnostem reagoval zcela jinak v průběhu přetavení. Díky malé tloušťce vzorku křemíku, ale především díky mnohem větší tepelné difuzivitě křemíku, vztah pro výpočet tepelné difuzivity:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (27)$$

a tepelná difuzivita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

λ tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

c měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

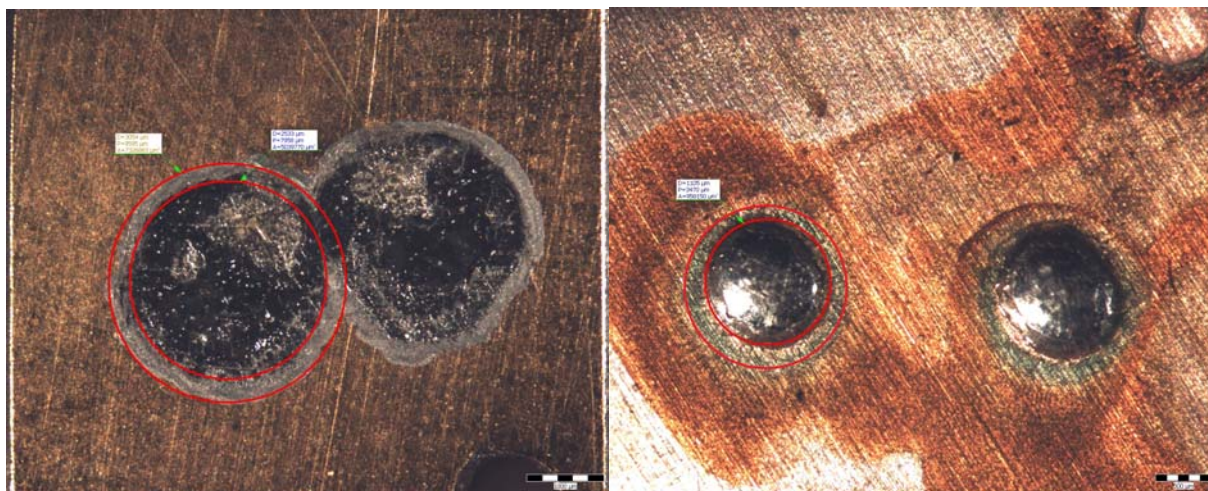
ρ hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Tepelná vodivost křemíku je $\lambda_{\text{Si}} = 141 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, ta je oproti základnímu materiálu FR4, $\lambda_{\text{FR4}} = 0,25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, o tři řády vyšší. Dochází tedy k rychlejšímu ohřevu kuličky pájky

a tím i k dřívějšímu přetavení. Posun začátku přetavení je o 4 s. Výsledný smáčecí úhel však u křemíku vychází vysokých $\theta = 69^\circ$.

2.4.1 Měření smáčecího úhlu po přetavení

Na obrázku Obr. 2.15 je znázorněno měření již přetavené kuličky pájky. Toto měření jsem prováděl na optickém mikroskopu s nastaveným zvětšením 26X. Měřil jsem poloměr roztečení, z kterého jsem pak stanovil dosažený úhel smáčivosti. Hodnotu takto získaného smáčecího úhlu jsem porovnal s výslednou hodnotou smáčecího úhlu, kterou jsem získal ze sekvence snímků.



Obr. 2.15 Odečítání průměru roztečené kuličky pájky pod optickým mikroskopem

Při měření každé kuličky jsem odečítal dva poloměry roztečení jak je vidět na Obr. 2.15, znázorněno červenými kružnicemi, z těchto dvou poloměrů jsem pak aritmetickým průměrem stanovil výsledný poloměr roztečení. Úhel smáčivosti jsem poté vypočítal dosazením do vzorců (15) a (20).

Tab. 2.2 Statistické vyhodnocení měření statického smáčecího úhlu

č. měření	průměr roztečení [μm]	poloměr základny vrchlíku ρ [m]	výška vrchlíku h [m]	tg θ [-]	úhel smáčivosti θ [°]
1	1062	0,000531	0,000143	0,582	30
2	1068	0,000534	0,000142	0,571	30
3	1037	0,000519	0,000150	0,630	32
4	1074	0,000537	0,000140	0,561	29
5	1056	0,000528	0,000145	0,593	31
6	1062	0,000531	0,000143	0,582	30
7	1043	0,000522	0,000148	0,618	32
8	1099	0,000550	0,000134	0,520	27
9	1068	0,000534	0,000142	0,571	30
10	1031	0,000516	0,000151	0,643	33
11	1043	0,000522	0,000148	0,618	32
12	1056	0,000528	0,000145	0,593	31
13	1019	0,000510	0,000155	0,669	34
14	1006	0,000503	0,000158	0,699	35
15	1050	0,000525	0,000146	0,604	31
16	1056	0,000528	0,000145	0,593	31
17	1031	0,000516	0,000151	0,643	33
18	1043	0,000522	0,000148	0,618	32
19	1037	0,000519	0,000150	0,630	32
20	1056	0,000528	0,000145	0,593	31
průměrný úhel smáčivosti [°]:					31

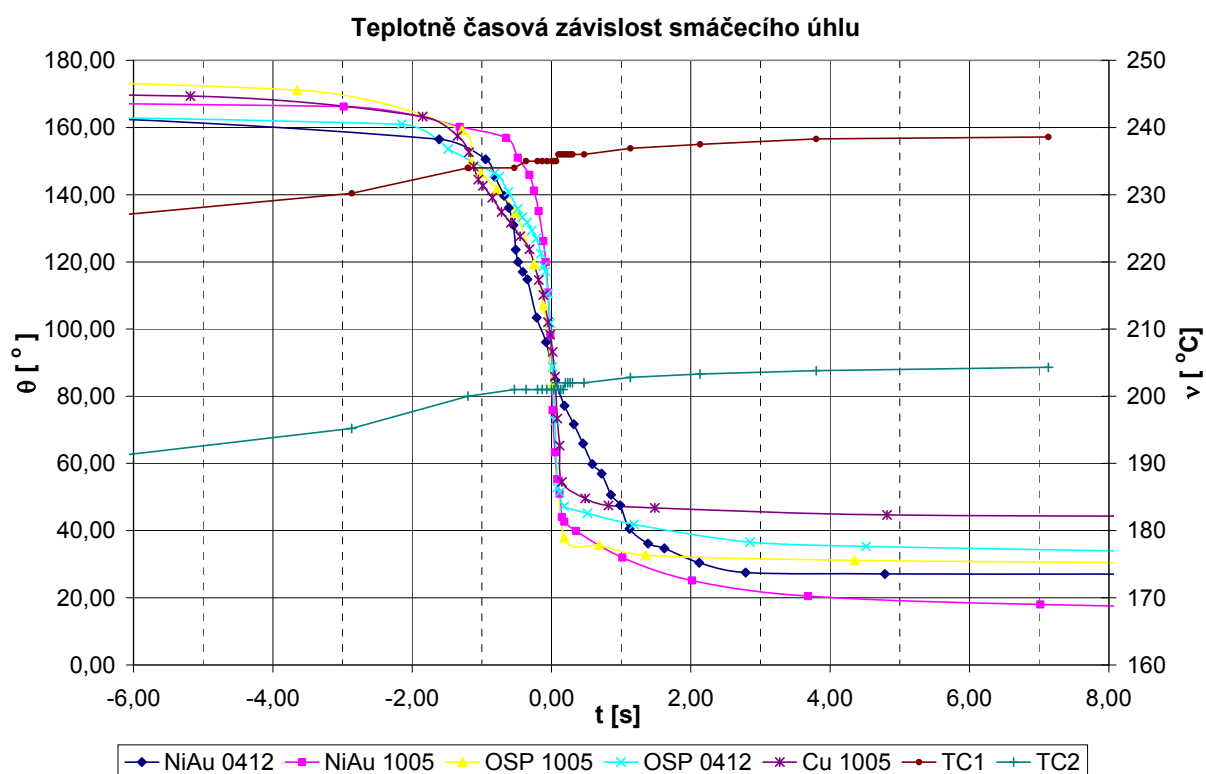
V tabulce 2.2 je zaznamenáno měření smáčecího úhlu po přetavení pro stárnuté vzorky s povrchovou úpravou OSP šarže 0412. Měření bylo provedeno na deseti vzorcích a ze změřených hodnot byla aritmetickým průměrem spočítána průměrná hodnota smáčecího úhlu.

Obdobná měření jsem provedl i pro všechny ostatní vzorky a výsledné hodnoty zaznamenal do tabulky 2.3. Rozdíl hodnot smáčecího úhlu mezi metodami jsem označil $\Delta\theta_m$.

Tab. 2.3 Porovnání výsledných smáčecích úhlů

typ vzorku	výsledný úhel smáčivosti metodou snímků z videokamery θ [°]	úhel smáčivosti měřený po přetavení θ [°]	rozdíl hodnot $\Delta\theta_m$ [°]
OSP 0412	32	31	1
OSP 1005	28	27	1
Cu bez PÚ 0412	42	41	1
NiAu 0412	27	24	3
NiAu 1005	15	10	5
Si	69	66	3

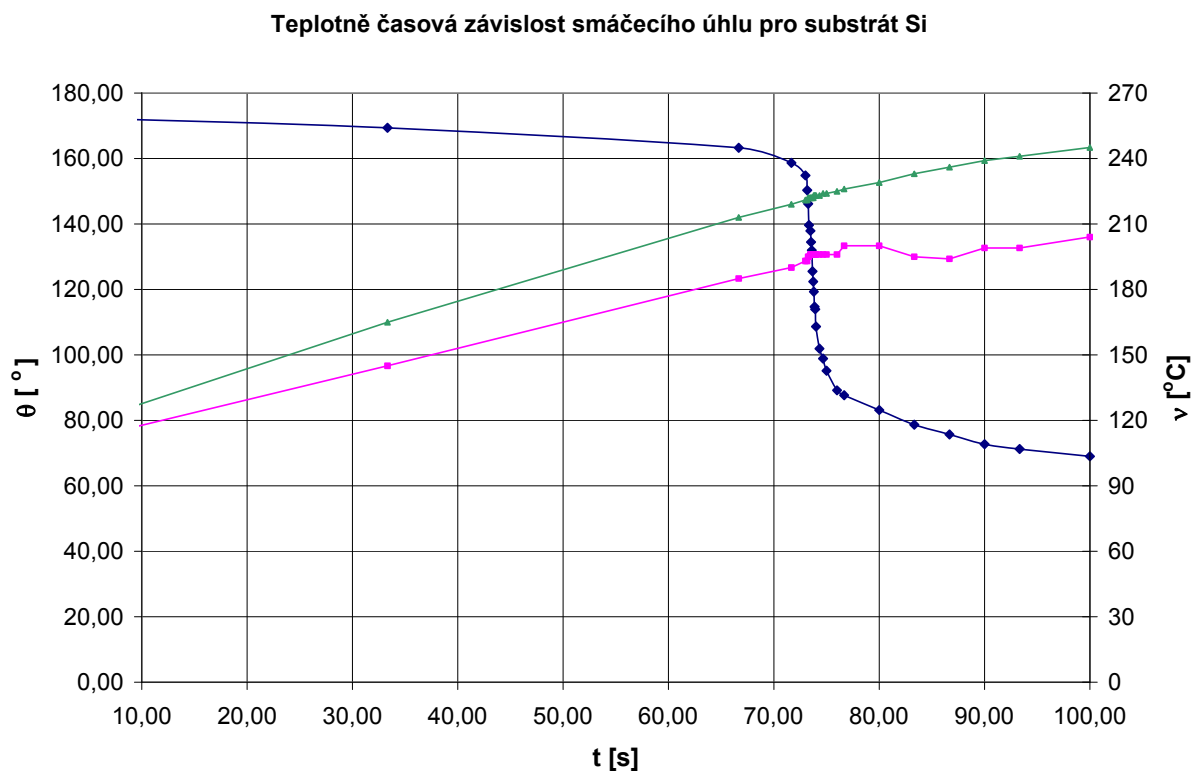
Rozdíl hodnot je v rozmezí $\pm 3^\circ$. Výjimku tvoří vzorky s povrchovou úpravou NiAu z výrobní šarže 1005, kde rozdíl hodnot dosahuje $\Delta\theta_m = 5^\circ$.



Obr. 2.16 Graf průběhu smáčecího úhlu společně s průběhem teplot

Pro úplnost výsledků jsem do grafu na Obr. 2.16 vynesl společně s průběhy smáčecího úhlu i průběh teploty ohřevu vzorku reprezentovaný termočlánkem TC1 a teploty na povrchu vzorku reprezentované termočlánkem TC2. Rozdíl v teplotě ohřevu a povrchu vzorku je

v průměru $\Delta_{TC} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$. K přetavení kuliček pájky začalo docházet při teplotě povrchu vzorku $v_{TC2} = 195 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Ohřev vzorku měl v tu dobu teplotu $v_{TC1} = 230 \text{ }^{\circ}\text{C}$.



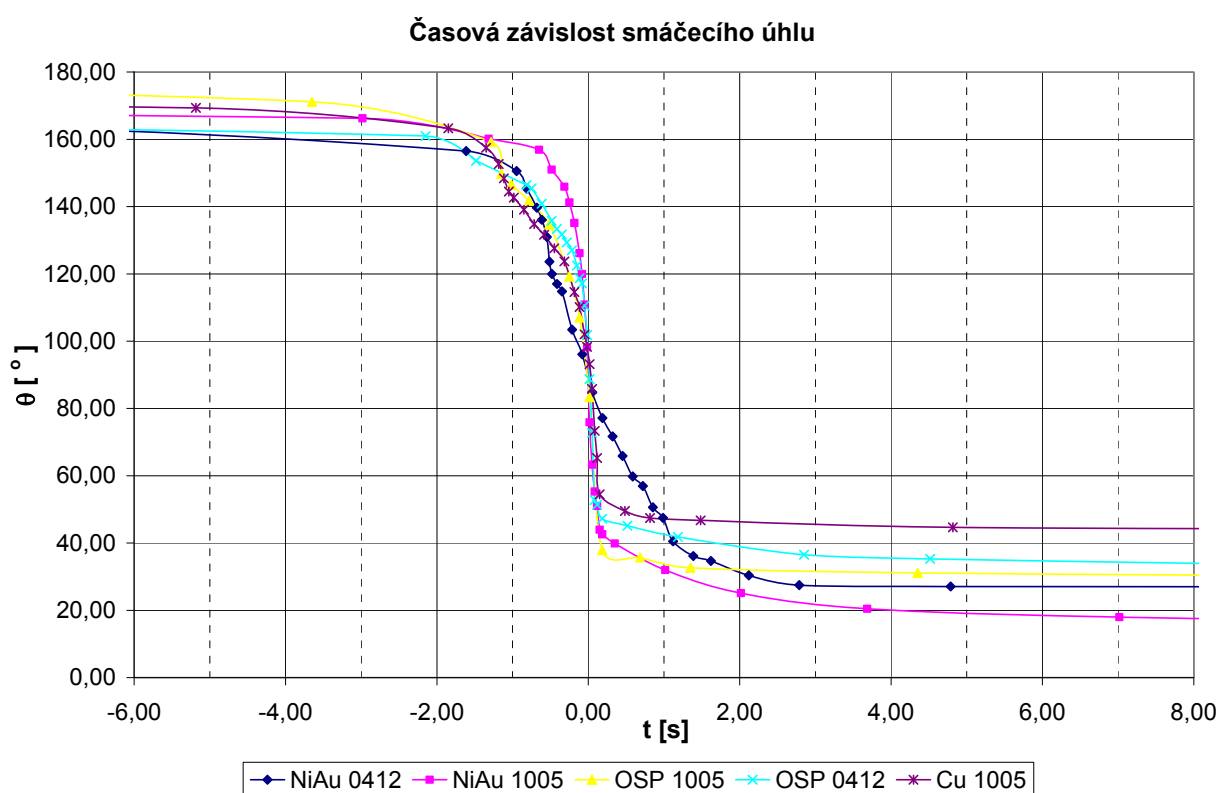
Obr. 2.17 Graf průběhu smáčecího úhlu pro substrát Si společně s průběhem teplot

Graf na Obr. 2.17 uvádím pro porovnání rozdílné tepelné difuzivity křemíku a základního materiálu FR4. Je zde vidět, že při měření prováděném na křemíku je rozdíl teplot mezi ohřevem vzorku a povrchem vzorku menší, v tomto případě je tento rozdíl teplot průměrně roven $\Delta_{TC} = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$. K začátku přetavení tu začíná docházet při teplotě povrchu vzorku $v_{TC2} = 185 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

3 Diskuze výsledků

Z dosažených výsledků uvedených v předchozí kapitole jsem vyvodil následující závěry.

Pro lepší názornost jsem zde použil graf průběhu smáčecího úhlu pro všechny typy použitých vzorků (Obr. 3.1). V kterém jsem pro přehlednost zvolil rozsah hodnot na časové ose od - 6 s do + 8 s.

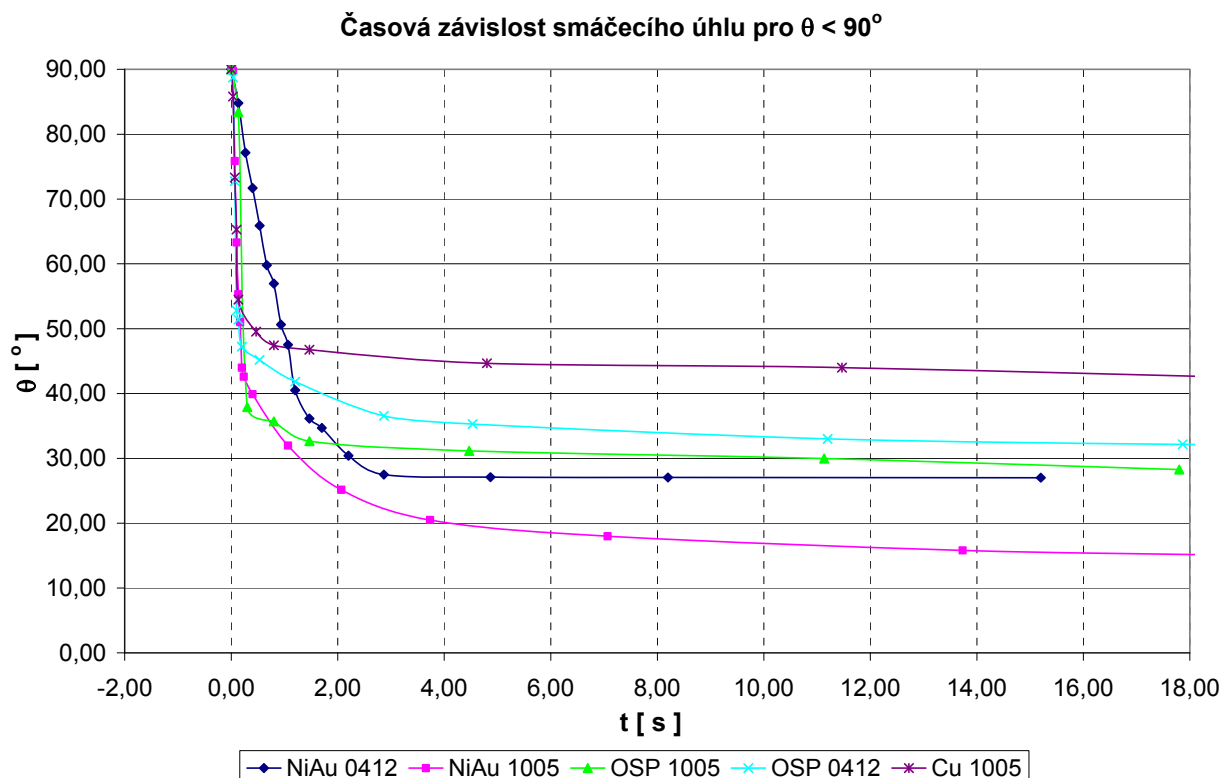


Obr. 3.1 Graf průběhu smáčecího úhlu pro všechny typy vzorků

Nejlepší smáčivosti jsem podle předpokladu dosáhl na nových vzorcích s povrchovou úpravou NiAu, úhel smáčivosti těchto vzorků se jako jediný dostal pod hranic 20 °. Rovněž dynamika smáčecího procesu reprezentovaná rychlostí smáčení dosáhla u těchto vzorků nejvyšší hodnoty a to $v_s = 325$ °/s. Pájka se tedy po povrchu velmi rychle roztékala a nebyl tak prostor k vytvoření nežádoucích sloučenin na rozhraní pájky, tavidla a okolní atmosféry v takzvaném „trojném bodě“. Jednotlivá měření těchto vzorků vykazovali velmi stabilní

průběhy s maximální odchylkou výsledného smáčecího úhlu $\pm 3^\circ$ od průměrné hodnoty $\theta = 15^\circ$. U rychlosti smáčení jsem zaznamenal pouze nepatrný rozdíl $\pm 2^\circ/\text{s}$, který mohl být způsoben i nepřesností při odečítání.

Pro lepší představu zde ještě uvádím graf na Obr. 3.2, v kterém je vynesena část průběhu smáčecího úhlu začínající při velikosti smáčecího úhlu 90° .



Obr. 3.2 Graf průběhu smáčecího úhlu s počátkem v inflexním bodě

Překvapující výsledky poskytli stárnuté vzorky s povrchovou úpravou NiAu. Výsledná velikost smáčecího úhlu byla sice oproti ostatním povrchovým úpravám vždy nižší minimálně o 1° . Oproti nestárnutým vzorkům se stejnou povrchovou úpravou však dosahovali mnohem většího rozdílu hodnot smáčecího úhlů při porovnání stárnutých a nestárnutých vzorků. Rozdíl výsledného smáčecího úhlu činil 12° oproti nestárnutým vzorkům, zatímco rozdíl u vzorků se stejnou šarží ale povrchovou úpravou OSP dosahoval rozdílu ve výsledném smáčecím úhlu pouze 4° mezi stárnutými a nestárnutými vzorky. Tento fakt ukazuje na značný obsah oxidů u stárnutých vzorků. Jelikož je ale zlato ušlechtilý kov, předpokládám, že k oxidaci dochází na vrstvičce niklu. K oxidaci zde dochází vlivem dlouhodobé difúze

okolního prostředí skrze tenkou vrstvičku zlata. U těchto vzorků také docházelo ke značnému rozptylu průběhů jednotlivých měření. Výsledný úhel smáčivosti se pohyboval v rozptylu hodnot $\theta \pm 10^\circ$ od průměrné hodnoty $\theta = 27^\circ$. Rychlost smáčení se u jednotlivých měření také dosti lišila. Zde však dochází k zajímavému jevu. Začátek průběhů a přetavení se mezi jednotlivými měřeními příliš nelišil, odchylka mezi měřeními nebyla vyšší než 4° , po dosažení teploty vzorku přibližně 195°C se však začal rozptyl změřených hodnot smáčecího úhlu rychle zvětšovat. Tento efekt si vysvětluji tak, že z počátku přetavení dochází pouze k interakci tekuté pájky s vrstvičkou zlata, která není zoxidována, po určité době však dojde k roztavení této vrstvičky zlata a začne docházet k interakcím na rozhraní tekuté pájky a niklu, který je po dlouhodobém skladování značně a hlavně nerovnoměrně zoxidován. V této technologii povrchové úpravy se tedy při dlouhodobém skladování nikl stává problematickým prvkem a byla by vhodná jeho náhrada za prvek jiný.

Když se nyní zaměřím na povrchovou úpravu OSP, tak výsledky měření vzorků s touto povrchovou úpravou dosahují mnohem menšího rozdílu hodnot $\Delta\theta$ mezi stárnutými vzorky a nestárnutými. Pokud porovnáme rozdíl hodnot $\Delta\theta$ mezi stárnutými a nestárnutými vzorky povrchové úpravy OSP oproti vzorkům povrchové úpravy NiAu, dostáváme rozdíl 8° .

Povrchová úprava OSP dosahuje také stabilnějších výsledků rychlosti smáčení, kde je rozptyl hodnot mezi stárnutými a nestárnutými vzorky $\Delta v_s = 4^\circ/\text{s}$. U povrchové úpravy NiAu je tato hodnota značně vyšší $\Delta v_s = 260^\circ/\text{s}$. U nestárnutých vzorků je rychlost smáčení větší na povrchové úpravě NiAu o $\Delta v_s = 120^\circ/\text{s}$ oproti povrchové úpravě OSP. Pro stárnuté vzorky je však hodnota rychlosti smáčení větší u povrchové úpravy OSP o $\Delta v_s = 136^\circ/\text{s}$.

Vzorky Cu bez povrchové úpravy byli zpracováváni čtvrtý den ode dne výroby, skladováni byli sice ve folii, která zamezovala přístupu vzduchu, přesto však dosáhly při měření nejhorších výsledků. Výsledný smáčecí úhel se pohyboval u všech měření nad hranicí 40° . Průměrná hodnota byla 42° , s odchylkou mezi jednotlivými měřeními $\pm 4^\circ$. Nelze tedy již mluvit o dobrém smáčení. Tyto hodnoty ukazují na velký obsah oxidů na povrchu vzorku, kde tvoří vrstvičku zabraňující dobrému smáčení. Proto jsem zkusil na tyto vzorky těsně před měřením aplikovat mikrolept, kterým bych tuto vrstvičku oxidů odstranil. Pro mikrolept byl použit standardní roztok HCl s peroxidem, který je běžně používán pro leptání DPS. Výsledek však měřené průběhy smáčecího úhlu nijak neovlivnil. Je to způsobenou velkou rychlostí oxidace měděného povrchu vzorku, který není chráněn žádnou povrchovou úpravou. Ke značné oxidaci pak dochází právě v průběhu přetavení, které neprobíhá v ochranné atmosféře ale na vzduchu a rychlost oxidace se s rostoucí teplotou o to víc zvyšuje.

Měření vzorků na substrátu křemíku bylo v největší míře ovlivněno použitými vzorky. Vzorky byli získávány ze značně stárnutých úlomků solárního článku. Od toho se odvíjí velký výsledný smáčecí úhel $\theta = 69^\circ$. Určitou roli sehrála i ploška kovového kontaktu solárního článku, na kterou byly kuličky pájky umístěny. Tato ploška byla určena k pájení olovnatou pájkou, zatímco pájka používaná při měřeních je bezolovnatá. Tímto měřením jsem tedy spíše demonstroval rozdíl v tepelné difuzivitě základního materiálu. Je zde tedy prostor pro vylepšení a v budoucnu by se toto měření na substrátu křemíku mohlo stát díky svým vlastnostem stěžejním.

Hodnoty výsledných smáčecích úhlů pro různé typy měřených vzorků, získaných měřicí metodou vyhodnocování videosekvencí, jsem doplnil o porovnání s hodnotami smáčecích úhlů získaných měřením roztečené pájky na mikroskopu po přetavení. Rozdíl hodnot smáčecího úhlu mezi těmito metodami je uveden v tabulce 2.3. Průměrná odchylka spočítaná aritmetickým průměrem je $\Delta\theta_m = 2,3^\circ \pm_{1,7^\circ}^{2,7^\circ}$. Z tabulky je vidět, že mnohem vyšší hodnoty rozdílu $\Delta\theta_m$ než u ostatních typů vzorků vychází pro nestárnuté vzorky s povrchovou úpravou NiAu. To je způsobeno téměř dokonalým roztečením pájky po povrchu, kdy rozlišovací schopnost měřicí metody pomocí videokamery již přestává stačit pro rozlišení pájky od okolí a z bočního pohledu pájka téměř splývá s rovinou vzorku. Pokud bychom tuto hodnotu vyloučili z výpočtu průměrné odchylky metod, dostali bychom hodnotu pro průměrnou odchylku $\Delta\theta_m = 1,8^\circ \pm_{0,8^\circ}^{1,2^\circ}$. Pro určení výsledného smáčecího úhlu je tedy měření roztečení pájky prováděné na optickém mikroskopu přesnější, nemůžeme při něm však pozorovat dynamiku procesu přetavení.

Z průběhů časových závislostí teploty a smáčecího úhlu je dobře vidět vliv rozdílné tepelné difuzivity základních materiálů měřených vzorků. Rozdíl mezi základními materiály FR4 a křemíkem v přestupu tepla skrze tento základní materiál je 7°C . Tato hodnota by teoreticky měla být mnohem vyšší, v mém případě je zde však velký vliv měděného plíšku sloužícího jako podložka pod vzorkem křemíku. Na rozhraních mezi touto podložkou a ohřevem, resp. vzorkem, dochází ke ztrátám ve vedení tepla, což degraduje lepší hodnotu difuzivity křemíku. V tomto bych viděl prostor pro budoucí zlepšení a optimalizaci procesu měření.

3.1 Chyby měření

Pro úplnost výsledků je třeba brát v potaz i dále uvedené chyby.

Mezi procesní vlivy, které mohli ovlivnit prováděné měření bychom měli zahrnout chybu způsobenou nerovnoměrným ohřevem vzorku. A především pak vliv okolního proudění v oblasti vzorku.

Odečítání výšky roztečené pájky z jednotlivých snímků videosekvence ovlivňuje chyba vlivem teplotní roztažnosti základního materiálu v z-ové ose. Hodnota teplotní roztažnosti pro použitý základní materiál vzorků je $TCE_{FR4} = 60 \text{ ppm.K}^{-1}$. Tuto chybu snížíme na minimum použitím jiného základního materiálu s menší teplotní roztažností v z-ové ose. V mém případě jsem použil křemík jehož teplotní roztažnost je $TCE_{Si} = 3,2 \text{ ppm.K}^{-1}$. Pro měření s organickým substrátem, pak bude možno tuto chybu odstranit až při vyhodnocování, zavedením korekce roviny vzorku.

Další chyba mohla být do procesu měření vnesena již při výrobě vzorků. Protože používané stárnuté vzorky šarže 0412 byly dodány výrobcem PCB Benešov, zatímco nestárnuté vzorky šarže 1005 byly vyrobeny firmou GATEMA Boskovice. Výrobní procesy obou firem se mohou lišit, což znamená, že i vlastnosti vyrobených vzorků mohou být nepatrně odlišné.

4 Závěr

Cílem této práce bylo vyhodnocování smáčení a roztékání kvaziomezeného množství bezolovnaté pájky na kovovém povrchu a porovnání různých povrchových úprav pozorovaných vzorků. V rámci práce jsem zdokonalil měřicí pracoviště implementováním nové videokamery a přidáním a zapojením druhé videokamery do měřicího procesu. Pro měřicí pracoviště jsem také zhotovil uchycení pro kameru, využívajícího milimetrového posuvu pro přesnější nastavení měření, a uchycení ohřevu vzorku, které umožňuje regulovat nastavení roviny. Za největší přínos považuji umístění měřicího systému na společnou základnu, čímž je docílena velmi snadná přenositelnost celého měřicího systému. To umožňuje snadný přechod na měření v ochranné atmosféře. Při použití pouze jedné kamery a jednoho zdroje světla se mi podařilo optimalizovat světelné podmínky, které jsou pro měření pomocí videokamery velmi důležité, tak aby bylo možno takto získané videosekvence vyhodnocovat automaticky pomocí k těmto měřením navrženého softwaru. Software pro automatické vyhodnocování, se mi podařilo realizovat až těsně před uzavřením práce. Z toho důvodu již pomocí něho nebyla provedena žádná měření. Jeho funkce však byla ověřena. Tento software umožňuje značné zrychlení vyhodnocovací metody. A tím přispívá k efektivnosti metody pro studium dějů probíhajícím na mezifázovém rozhraní.

Nad rámec zadání bylo provedeno měření na substrátu křemíku, kdy byl sledován rozdílný přestup tepla skrze substrát základního materiálu vzorku. Toto měření potvrdilo teoretický předpoklad lepšího přestupu tepla pro substrát křemíku oproti substrátu FR4, daný rozdílnými fyzikálními vlastnostmi těchto substrátů, především v tepelné difuzivitě. Měření na křemíku mělo také odstranit chybu vznikající velkou tepelnou roztažností základního materiálu FR4 v z-ové ose. Pro toto měření však nevyhovoval hrot ohřevu, na který se upevňoval měřený vzorek. Naskýtá se zde tedy možnost v budoucnosti tento problém řešit výměnou hrotu ohřevu a nebo modifikací stávajícího hrotu.

Při vyhodnocování jsem pro výpočet měřeného smáčecího úhlu využil nový vzorec, který jsem odvodil. Při odvození jsem vycházel z teoretických poznatků načerpaných z literatury. Tento vzorec byl navrhnut, tak aby co nejlépe vyhovoval pozdějšímu zautomatizování vyhodnocování.

Zajímavé by do budoucna mohlo být i implementování a využití vyhodnocovací metody sledováním TPL, která je v dnešní době velmi populární.

V práci jsem z dosažených výsledků vyvodil závěry uvedené v kapitole diskuze výsledků. Výsledky potvrdili teoretický předpoklad lepšího smáčení nestárnutých vzorků oproti stárnutým, dále také lepší smáčení povrchové úpravy NiAu oproti povrchové úpravě OSP pro nestárnuté vzorky. Čímž byla potvrzena správnost zavedené vyhodnocovací metody. Zajímavého zjištění však bylo dosaženo při porovnání stárnutých vzorků těchto dvou povrchových úprav. Zatímco při zpracování vzorků v krátkém čase po jejich výrobě je pro lepší smáčení mnohem výhodnější povrchová úprava NiAu. Při dlouhodobém skladování se však tato povrchová úprava stává velmi problematickou. Z dlouhodobého hlediska tak vychází lépe povrchová úprava OSP, která se i při dlouhodobém skladování projevuje stálostí svých vlastností.

Při vyhodnocování jsem také vypožadoval zajímavou zákonitost. U všech měřených vzorků odpovídal úhel smáčivosti o velikosti 90° poklesu kuličky pájky na 63 % její původní výšky.

Pro budoucí využití této měřicí metody navrhuji zakoupení druhé videokamery typu MS-01U, kterou by byla nahrazena stávající kamera PANASONIC. Dosáhlo by se tak shodného rozlišení obrazu z obou měřících videokamer. Díky jejich umístění z dvou různých pozorovacích pohledů, by se tak nabízela možnost vytvoření 3D modelu průběhu smáčení za pomoci vyhodnocování záběrů z obou kamer.

5 Seznam použitých zkratk

L	-	Liquid
S	-	Solid
F	-	Flux
CCD	-	Charge-Coupled Device
CMOS	-	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
CSP	-	Chip Scale Package
ČB	-	Černo-Bílá
DPS	-	Deska Plošných Spojů
ENIG	-	Electroless Nickel Immersion Gold
FR4	-	Flame Resistant
IMC	-	Intermetallic Compaund
LED	-	Light-Emitting Diode
NiAu	-	Niccolum Aurum
NTSC	-	National Television System(s) Committee
OSP	-	Organic Solder Protectives
PC	-	Personal Computer
PCB	-	Printed Circuit Board
PÚ	-	Povrchová Úprava
SAC	-	Označení slitiny pájky Sn-Ag-Cu
SBSC	-	Solder Ball Shape Comparison
SMT	-	Surface Mount Technology

TC	-	Thermocouple
TCE	-	Thermal Coefficient of Expansion
TPL	-	Triple Point Line
USB	-	Universal Serial Bus
ZM	-	Základní Materiál

6 Seznam obrázků

Obr. 1.1 Schématické rozdělení typů pájitelných povrchů.....	- 27 -
Obr. 1.2 Závislost rychlosti rozpouštění vybraných kovů v klidné lázni na teplotě lázně. -	28 -
Obr. 1.3 Smáčení povrchu destičky v pájce (nesmáčení).....	- 29 -
Obr. 1.4 Smáčení povrchu destičky v pájce (smáčení).....	- 30 -
Obr. 1.5 Hodnocení pájitelnosti úhlem smáčivosti podle tvaru pájky.....	- 31 -
Obr. 1.6 Schématické rozdělení typů pájitelných povrchů.....	- 32 -
Obr. 1.7 Schématické znázornění metody postupujícího kontaktního úhlu [9]	- 33 -
Obr. 1.7 Schématické znázornění metody nastřelování tekuté pájky [10]	- 34 -
Obr. 2.1 Měřicí sestava osazená videokamerou MS-01U	- 36 -
Obr. 2.2 Měřicí pracoviště osazené oběmi videokamerami	- 37 -
Obr. 2.3 Různé pohledy na vzorek, pořízené ve stejný čas dvěma kamerami	- 38 -
Obr. 2.4 Vzorek usazený v drážce ohřevu, umístění termočlánků TC2, TC3, TC4.....	- 39 -
Obr. 2.5 Kulička pájka na povrchu substrátu křemíku	- 40 -
Obr. 2.6 Měření průměru apertur šablony pro nanášení tavidla	- 42 -
Obr. 2.7 Měření naneseného tavidla ze snímku pořízeného videokamerou	- 43 -
Obr. 2.8 Okno programu pro automatické odečítání výšky z fotografií.....	- 47 -
Obr. 2.9 Geometrie kulového vrchlíku	- 48 -
Obr. 2.10 Graf měření pro vzorky s povrchovou úpravou NiAu.....	- 52 -
Obr. 2.11 Graf měření pro vzorky s povrchovou úpravou OSP a Cu bez PÚ	- 53 -
Obr. 2.12 Graf měření pro stárnuté vzorky s různou povrchovou úpravou.....	- 54 -
Obr. 2.13 Graf měření pro nestárnuté vzorky s různou PÚ a pro Cu bez PÚ	- 55 -
Obr. 2.14 Graf měření smáčecího úhlu se všemi typy vzorků.....	- 56 -

Obr. 2.15	Odečítání průměru roztečené kuličky pájky pod optickým mikroskopem.....	- 57 -
Obr. 2.16	Graf průběhu smáčecího úhlu společně s průběhem teplot.....	- 59 -
Obr. 2.17	Graf průběhu smáčecího úhlu pro substrát Si společně s průběhem teplot.....	- 60 -
Obr. 3.1	Graf průběhu smáčecího úhlu pro všechny typy vzorků.....	- 61 -
Obr. 3.2	Graf průběhu smáčecího úhlu s počátkem v inflexním bodě	- 62 -

7 Seznam tabulek

Tab. 1.1 Členění dle ANSI J-STD-004 [2]	- 13 -
Tab. 2.1 Měření reálného objemu tavidla	- 44 -
Tab. 2.2 Statistické vyhodnocení měření statického smáčecího úhlu	- 58 -
Tab. 2.3 Porovnání výsledných smáčecích úhlů	- 59 -

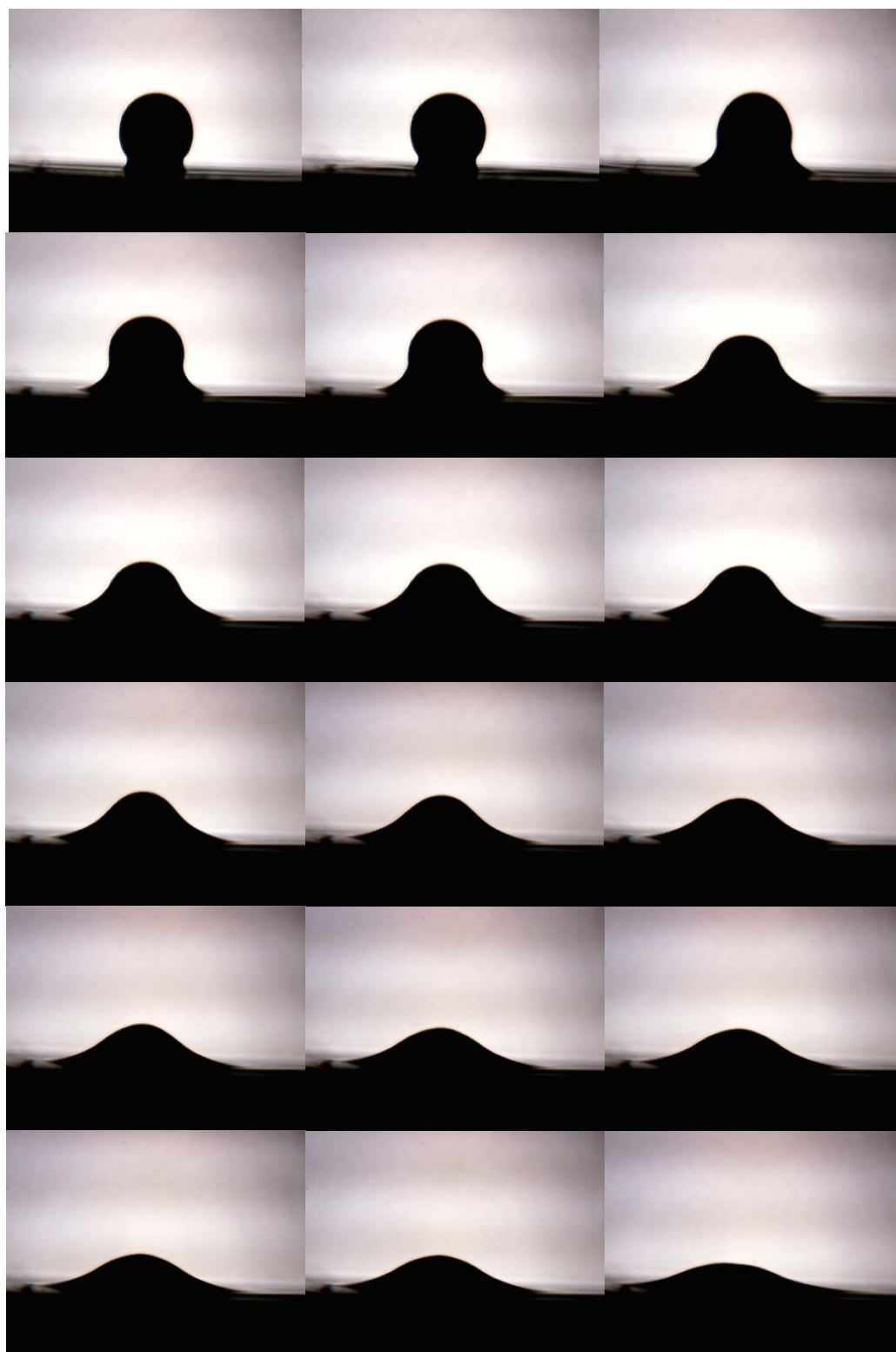
8 Seznam použitých zdrojů

- [1] Wassink, R. J. K. *Soldering in Electronics*. Second Edition. Electrochemical Publications Ltd. Ayr, Scotland. 1989. ISBN 9-901150-24-X.
- [2] Starý, Jiří. *Disertační práce, Bezolovnaté pájení - materiálová a procesní kompatibilita v inertní a inertně/redukční atmosféře*. FEKT, VUT Brno.
- [3] Starý, Jiří, Zatloukal, Miroslav. *Montážní a propojovací technologie*. FEKT, VUT Brno. 2007
- [4] Hwang, Jennie S. *Modern Solder Technology for Competitive Electronics Manufacturing*. McGraw-Hill 1996. ISBN 0-07-031749-6.
- [5] Martínek Antonín. *Pájení v elektronice*. TESLA VÚST. Praha 1990
- [6] Skočil, Vlastimil. *Mikrodiagnostika pro mikroelektroniku*. V Diagnostika '97. ZU Plzeň 1997. ISBN 80-7082-342-9.
- [7] Urbánek, Jan. *Některé příčiny snížení kvality pájených spojů*. V Aplikovaná elektronika '98, str. 196. Plzeň 1998.
- [8] Szendiuch, I. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*, ISBN80-214-3292-6, VUTIUM, Brno 2007
- [9] Metodologie firmy KRÜSS *Advancing Surface Science*, 2008, Dostupná na www stránkách: <http://www.kruss.de/en/theory/measurements.html>
- [10] Xu, Jing; Liu, Xingbo; Brigit, Mark A; Hemrick, James G; Barbero, Ever. *REACTIVE WETTING OF AN METALSURFACE BY SAC ALLOY*, 6 s., Materials Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, USA. 2007
- [11] Ramé-hart instruments co.: *Surface Science Instruments*, 23. 5. 2010, www: <http://www.ramehart.com/goniometers/index.htm>
- [12] Akylas, T.R., Peacock, T. *Fluid Dynamics* 13. 5. 2010, www: <http://web.mit.edu/1.63/www/lecnote.html>

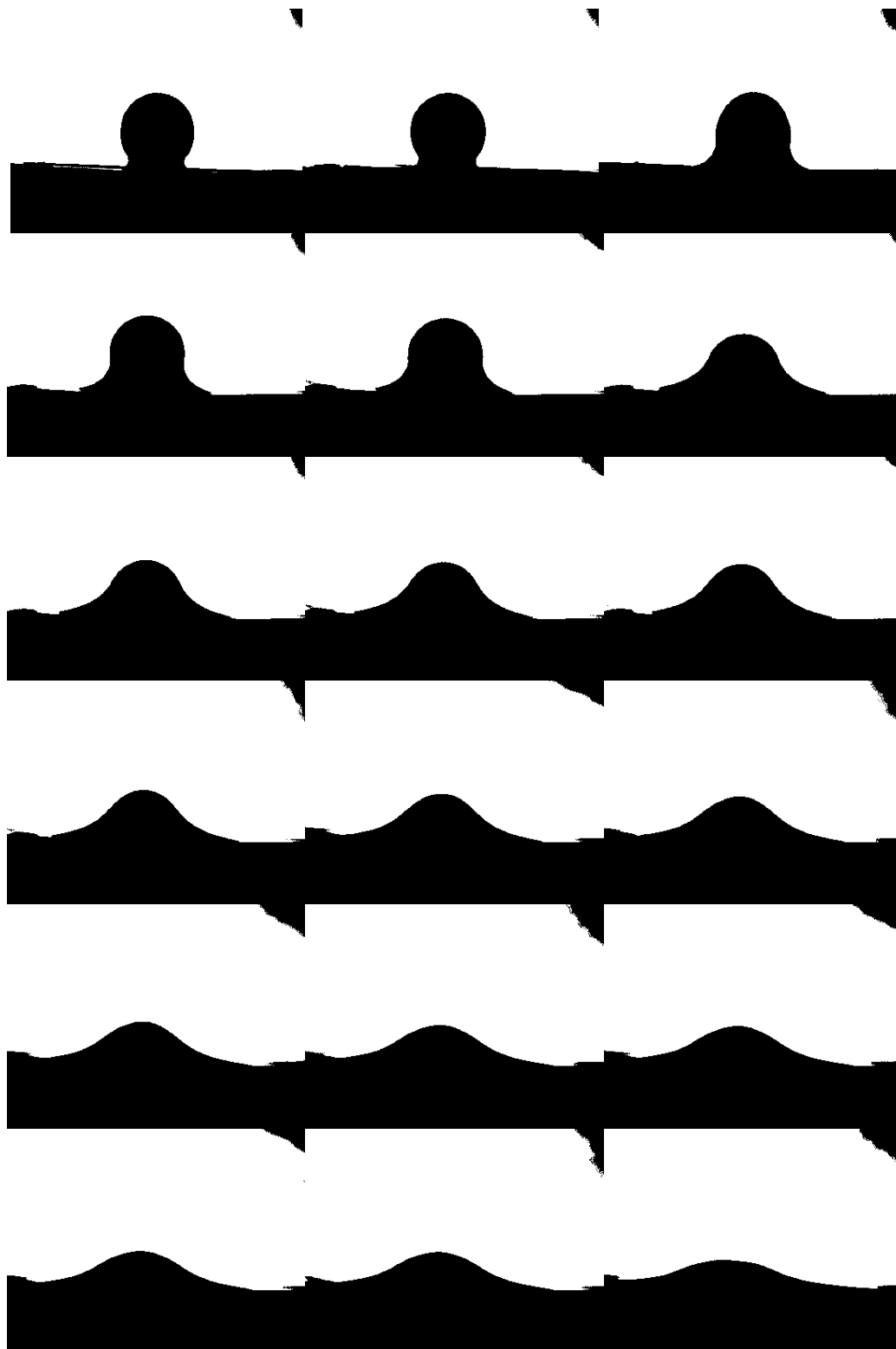
Seznam příloh

Příloha 1: Sekvence snímků připravených k analýze.....	- 57 -
Příloha 2: Sekvence snímků převedená do ČB bitmapy pro automatické vyhodnocování -	59 -
Příloha 3: Příklad výpočtu smáčecího úhlu.....	- 60 -

Příloha 1: Sekvence snímků připravených k analýze



Příloha 2: Sekvence snímků převedená do ČB bitmapy pro automatické vyhodnocování



Příloha 3: Příklad výpočtu smáčecího úhlu zde pro stárnuté vzorky s PÚ OSP

č. snímku [-]	výška vrchliku h [m]	poloměr základny vrchliku ρ [m]	$\text{tg } \theta$ [-]	úhel smáčivosti pro $\text{tg } \theta$ θ [°]	$\cos \theta$ [-]	úhel smáčivosti pro $\cos \theta$ θ [°]	čas t [s]	č. měření profiloměru [-]	Teplota TC1 [°C]	Teplota TC2 [°C]
1000	0,498	0,0206	-0,083	-4,7	-0,997	175,3	33,3	167	181	144
1500	0,498	0,0206	-0,083	-4,7	-0,997	175,3	50,0	250	204	166
2000	0,492	0,0585	-0,241	-13,6	-0,972	166,4	66,7	333	226	183
2150	0,488	0,0736	-0,309	-17,1	-0,956	162,9	71,7	358	232	192
2190	0,484	0,0861	-0,367	-20,2	-0,939	159,8	73,0	365	233	197
2195	0,480	0,0970	-0,421	-22,8	-0,922	157,2	73,2	366	234	197
2200	0,468	0,1241	-0,571	-29,7	-0,869	150,3	73,3	367	234	197
2205	0,456	0,1464	-0,716	-35,6	-0,813	144,4	73,5	368	234	197
2208	0,450	0,1564	-0,791	-38,3	-0,784	141,7	73,6	368	234	197
2210	0,446	0,1627	-0,842	-40,1	-0,765	139,9	73,7	368	234	197
2214	0,434	0,1804	-1,005	-45,2	-0,705	134,8	73,8	369	234	196
2218	0,424	0,1941	-1,158	-49,2	-0,654	130,8	73,9	370	234	193
2222	0,416	0,2044	-1,296	-52,3	-0,611	127,7	74,1	370	234	193
2224	0,408	0,2143	-1,451	-55,4	-0,567	124,6	74,1	371	235	193
2226	0,400	0,2239	-1,630	-58,5	-0,523	121,5	74,2	371	235	193
2228	0,390	0,2354	-1,899	-62,2	-0,466	117,8	74,3	371	235	193
2230	0,380	0,2465	-2,240	-65,9	-0,408	114,1	74,3	372	235	193
2234	0,372	0,2552	-2,591	-68,9	-0,360	111,1	74,5	372	235	193
2238	0,362	0,2658	-3,185	-72,6	-0,300	107,4	74,6	373	235	192
2240	0,348	0,2803	-4,583	-77,7	-0,213	102,3	74,7	373	235	192
2242	0,326	0,3025	-13,355	-85,7	-0,075	94,3	74,7	374	235	192
2244	0,318	0,3105	-41,971	-88,6	-0,024	91,4	74,8	374	235	192
2246	0,308	0,3205	25,099	87,7	0,040	87,7	74,9	374	235	192
2248	0,292	0,3366	7,013	81,9	0,141	81,9	74,9	375	235	192
2250	0,276	0,3529	4,028	76,1	0,241	76,1	75,0	375	235	192
2251	0,262	0,3675	2,900	71,0	0,326	71,0	75,0	375	235	192
2252	0,250	0,3804	2,314	66,6	0,397	66,6	75,1	375	235	192
2253	0,228	0,4052	1,647	58,7	0,519	58,7	75,1	376	235	194
2255	0,196	0,4453	1,092	47,5	0,675	47,5	75,2	376	235	194
2260	0,194	0,4481	1,066	46,8	0,684	46,8	75,3	377	236	195
2280	0,184	0,4622	0,946	43,4	0,726	43,4	76,0	380	236	195
2300	0,182	0,4651	0,924	42,7	0,734	42,7	76,7	383	236	195
2500	0,170	0,4835	0,802	38,7	0,780	38,7	83,3	417	242	205
2800	0,152	0,5143	0,648	32,9	0,839	32,9	93,3	467	248	210